


SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE EMBUTICIÓN MEDIANTE ANSYS LS-DYNA




Autor	Natalia García Gayol
Tutor	Alejandro Quesada González
Departamento	Ingeniería Mecánica
Titulación	Ingeniería Técnica Industrial, Mecánica
Universidad	Carlos III de Madrid
Fecha	Julio 2009


	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Página: i
--	--------------------------------------	------------------

Índice de Contenidos


1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Objetivos	9
1.2. Antecedentes	9
1.3. Contenidos	9
2. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	11
2.1. El Método de los elementos finitos en medios continuos	11
2.1.1. Formulación general	11
2.1.1.1. Elemento	11
2.1.1.2. Campo de desplazamientos del elemento	11
2.1.1.3. Campo de deformaciones del elemento.....	13
2.1.1.4. Campo de esfuerzos del elemento.....	13
2.1.1.5. Equilibrio del elemento	13
2.1.1.6. Integración del sistema de ecuaciones para el medio continuo.....	14
2.1.2. Formulación para ANSYS LS-DYNA y discretización mediante elemento tipo Shell 163	14
2.1.2.1. Elemento Shell 163	14
2.1.2.2. Campo de desplazamientos del elemento	15
2.1.2.3. Campo de deformaciones del elemento.....	16
2.1.2.4. Campo de esfuerzos del elemento.....	17
2.1.2.5. Equilibrio del elemento	17
2.1.2.6. Integración del sistema de ecuaciones para el medio continuo.....	19
3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN	20
3.1. Contexto de los procesos de fabricación actuales.....	20
3.1.1. La Situación actual del sector automoción	20
3.1.2. La evolución de los materiales de fabricación	21
3.1.3. Estudio comparativo de los nuevos materiales de fabricación	22
3.1.3.1. Aceros de alta resistencia y ultra alta resistencia	22
3.1.3.2. Aleaciones ligeras	22
3.1.3.3. Composites	23
3.1.3.4. Cerámicos estructurales.....	23
3.1.4. Evolución de los procesos de diseño y fabricación	24
3.2. Descripción del proceso de fabricación	24

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Página: ii
--	--------------------------------------	----------------

3.2.1.	Tipos de procesos de conformado por deformación plástica	25
3.2.1.1.	Laminado	25
3.2.1.2.	Forja y Extrusión	25
3.2.1.3.	Punzonado y corte de las chapas.....	28
3.2.1.4.	Plegado.....	28
3.2.1.5.	Estirado.....	29
3.2.2.	El proceso de embutición	29
3.2.2.1.	Descripción del proceso de embutición	29
3.2.2.2.	Herramientas empleadas.....	30
3.2.2.3.	Tipos de procesos de embutición	30
3.2.2.4.	Fabricación de herramientas para embutición profunda.....	32
3.2.3.	Descripción del proceso de fabricación de la pieza en estudio.....	33
4.	METODOLOGÍA.....	36
4.1.	La herramienta ANSYS y el módulo LS-DYNA	36
4.1.1.	Métodos de resolución de ambas aplicaciones.....	36
4.1.2.	ANSYS y el módulo LS-DYNA	43
4.1.2.1.	Preprocesador	49
4.1.2.2.	Solución	65
4.1.2.3.	Post-procesador.....	70
4.2.	Descripción de la metodología – Pasos a seguir.....	70
4.2.1.	Modelizado 3D de la geometría	72
4.2.2.	Comprobación del estado de la geometría en ANSYS	72
4.2.3.	Desarrollo de una herramienta de simulación mediante el programa de elementos finitos ANSYS LS-DYNA.....	78
4.2.3.1.	Primera embutición: Etapa_0.....	80
4.2.3.2.	Segunda embutición: Etapa_1.....	93
4.2.3.3.	Tercera Embutición: Etapa_2	98
5.	RESULTADOS	103
5.1.	Resultados y análisis de resultados	103
5.2.	Recordatorio de las hipótesis del modelo de simulación.....	103
5.3.	Descripción de los componentes del modelo	103
5.3.1.	Placa	103
5.3.2.	Herramientas.....	105
5.3.2.1.	Etapa_0: Primera Embutición	105
5.3.2.2.	Etapa_1: Segunda Embutición	107

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Página: iii</p>
--	---	-------------------------------

5.3.2.3.	Etapa_2: Tercera Embutición.....	110
5.4.	Resultados	112
5.4.1.	Obtención de los Resultados	112
5.4.2.	Etapa_0: Primera embutición	113
5.4.2.1.	Resultados	113
5.4.2.2.	Análisis de los Resultados	121
5.4.3.	Etapa_1: Segunda embutición.....	123
5.4.3.1.	Resultados	123
5.4.3.2.	Análisis de los Resultados	130
5.4.4.	Etapa_2: Tercera embutición.....	132
5.4.4.1.	Resultados:	132
5.4.4.2.	Análisis de los Resultados	141
6.	CONCLUSIONES	143
7.	TRABAJOS FUTUROS	145
8.	GLOSARIO DE TÉRMINOS Y DEFINICIONES	146
9.	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS UTILIZADAS	149
ANEXO A		
ANEXO B		

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Página: iv
--	--------------------------------------	-------------------

Índice de Figuras

Figura 2-1	Representación esquemática del campo de desplazamientos de un elemento	12
Figura 2-2	Fuerzas que intervienen en el equilibrio de un elemento	13
Figura 2-3	Elementos Shell 163 de 3 y 4 nodos	15
Figura 2-4	Representación esquemática del campo de desplazamientos del elemento	16
Figura 2-5	Esquema de desplazamientos, giros, fuerzas y momentos en un nodo.....	18
Figura 3-1	Ciclos del Combustible y del vehículo	20
Figura 3-2	Pieza final que incluye el punzonado	24
Figura 3-3	Proceso de Laminación: Fuerzas aplicadas	25
Figura 3-4	Forja en matriz abierta o libre	26
Figura 3-5	Forja en estampa	26
Figura 3-6	Procesos de extrusión directa e inversa	27
Figura 3-7	Extrusión inversa por choque	27
Figura 3-8	Extrusión por impacto	28
Figura 3-9	Chapa sometida a operación de corte	28
Figura 3-10	Proceso de Estirado	29
Figura 3-11	Prensas de Simple efecto	30
Figura 3-12	Prensas de doble efecto	31
Figura 3-13	Embutición Inversa	31
Figura 3-14	Punzones y dispositivos de sujeción para la primera y sucesivas embuticiones	32
Figura 3-15	Taladro en el punzón de embutir	33
Figura 3-16	1ª Operación de embutición de la Pieza de soporte de la rueda de repuesto	34
Figura 3-17	2ª Operación de embutición de la Pieza de soporte de la rueda de repuesto	34
Figura 3-18	3ª Operación de embutición de la Pieza de soporte de la rueda de repuesto	35
Figura 3-19	4ª Operación de embutición de la Pieza de soporte de la rueda de repuesto	35
Figura 3-20	5ª Operación: Punzonado de la Pieza de soporte de la rueda de repuesto	35
Figura 4-1	Simulación explícita Simple: Pasos Realizados	37


	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Página: v
--	--------------------------------------	------------------

Figura 4-2	Simulación doble explícita: Pasos Realizados.....	42
Figura 4-3	Elemento Shell 163.....	52
Figura 4-4	Cálculo del incremento de tiempo de la simulación	61
Figura 4-5	Esquema general de realización de un “Full Restart”	69
Figura 4-6	Pieza final que se debería obtener tras las cuatro etapas de la embutición.....	70
Figura 4-7	Esquema general del desarrollo del proceso de simulación de los cuatro pasos de la embutición	71
Figura 4-8	Punzón real y modelización 3D del Punzón_Etapa_1	72
Figura 4-9	Placa creada a partir del escaneado inicial de la real	72
Figura 4-10	Herramientas Conjunto_Etapa_0.....	73
Figura 4-11	Herramientas Conjunto_Etapa_1 (geometría sin limpiar)	74
Figura 4-12	Herramientas Conjunto_Etapa_1 (geometría limpia)	74
Figura 4-13	Placa alabeada Etapa_1 (matriz sin superficie horizontal añadida).....	75
Figura 4-14	Área importada desde ANSYS directamente (sin limpiar).....	75
Figura 4-15	Herramientas Conjunto_Etapa_2 (geometría sin limpiar)	76
Figura 4-16	Herramientas Conjunto_Etapa_2 (geometría limpia)	77
Figura 4-17	Herramientas Conjunto_Etapa_3 (geometría sin limpiar)	77
Figura 4-18	Herramientas Conjunto_Etapa_3 (geometría limpia)	78
Figura 4-19	Placa con la forma final después de todo el proceso de conformado (incluyendo los punzonados)	78
Figura 4-20	ANSYS PRODUCT LAUNCHER	79
Figura 4-21	Tipos de análisis y métodos de resolución de ANSYS	80
Figura 4-22	Geometría Etapa 0 (montaje final)	81
Figura 4-23	Elección del tipo de elemento (Thin Shell 163).....	81
Figura 4-24	Constantes Reales (espesor de la placa)	82
Figura 4-25	Material Plastic Kinematic para la placa.....	83
Figura 4-26	Rigid Material para las herramientas	83
Figura 4-27	Asignación de propiedades (Mesh Attributes).....	84
Figura 4-28	Placa dividida por zonas para mallado de distinta densidad.....	85
Figura 4-29	Creación de un Componente a partir de Nodos.....	86
Figura 4-30	Diferencias en el método de creación de las Parts (individual y automático)	86
Figura 4-31	Creación de la Part 1 (Placa).....	87


	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Página: vi</p>
--	---	--------------------------

Figura 4-32 Creación combinada de “Parts”	87
Figura 4-33 Definición de los Contactos	88
Figura 4-34 Representación del vector desplazamiento del punzón frente al tiempo	89
Figura 4-35 Definición de los Vectores	89
Figura 4-36 Definición de las entradas del vector Tiempo_Etapa_0	90
Figura 4-37 Aplicación de las Cargas	91
Figura 4-38 New Análisis (comando EDSTART)	92
Figura 4-39 “Full Restart” en la Etapa_1	94
Figura 4-40 Conjunto_Etapa_1 (montaje final)	95
Figura 4-41 Comando EDIS	97
Figura 4-42 “Full Restart” Etapa_2	99
Figura 4-43 Conjunto_Etapa_2 (montaje final)	99
Figura 4-44 Tamaño del mallado restringido por la geometría	100
Figura 5-1 Placa de partida acotada y dividida en áreas para el mallado de densidad variable	104
Figura 5-2 Esquema acotado del Conjunto_Etapa_0	105
Figura 5-3 Vectores desplazamiento Etapa_0	107
Figura 5-4 Esquema acotado del Conjunto_Etapa_1	108
Figura 5-5 Vector desplazamiento de la Matriz Etapa_1	110
Figura 5-6 Esquema acotado del Conjunto_Etapa_2	110
Figura 5-7 Vector desplazamiento de la Matriz Etapa_2	112
Figura 5-8 Tramos considerados para las mediciones	113
Figura 5-9 Aproximación de la cota “y” de los nodos entre $-0,7\text{mm} > y < 0,7\text{mm}$ a $y = 0$	113
Figura 5-10 Placa Etapa_0, punzón impactando con la placa sin deformar ($t = 0.8$ seg)	114
Figura 5-11 Placa Etapa_0, máxima profundidad de embutición ($t = 1$ seg)	114
Figura 5-12 Placa Etapa_0, retirada del punzón ($t = 1.5$ seg)	115
Figura 5-13 Placa Etapa_0, final de la embutición ($t = 2$ seg)	115
Figura 5-14 Esquema de las medidas realizadas en la placa simulada	116
Figura 5-15 Escaneado de la placa real embutida	118
Figura 5-16 Resultados Etapa_0	120
Figura 5-17 Detalle de los resultados de la embutición de la Etapa_0	121



	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Página: vii
--	--------------------------------------	--------------------

Figura 5-18 Placa Etapa_1 inicio de la simulación (t = 2.5 segundos)	123
Figura 5-19 Placa Etapa_1 embutición máxima (t = 3.1 segundos)	124
Figura 5-20 Placa Etapa_1 final de la simulación (t = 3.47 seg)	124
Figura 5-21 Detalle del perfil Placa Etapa_1 final de la simulación (t = 3.47 seg).....	125
Figura 5-22 Esquema de las medidas realizadas en la placa simulada	125
Figura 5-23 Escaneado de la Etapa_1	127
Figura 5-24 Resultados Etapa_1	129
Figura 5-25 Detalle de los resultados de la embutición de la Etapa_1	130
Figura 5-26 Placa Etapa_2 instantes iniciales de la simulación (t = 4.5 seg)	132
Figura 5-27 Placa Etapa_2, secuencia intermedia (t = 6.45 seg)	133
Figura 5-28 Etapa_2, final de la embutición con resultado de rotura parcial (t=7.8 seg)	133
Figura 5-29 Etapa_2, final de la embutición con resultado de rotura parcial (t = 8.45 seg)	134
Figura 5-30 Vista de perfil del final de la Etapa_2 de la embutición instante (t = 8.45 seg)	134
Figura 5-31 Esquema de las medidas realizadas en la placa simulada	135
Figura 5-32 Escaneado de la placa real en la Etapa 2	137
Figura 5-33 Resultados Etapa 2	140
Figura 5-34 Detalle de los resultados de la embutición de la Etapa 2	141

Índice de Tablas

Tabla 3-1	Comparación cualitativa de los materiales	23
Tabla 4-1	Comparativa entre ANSYS, LS DYNA y ANSYS LS-DYNA	38
Tabla 4-2	Posible resolución del proceso completo (simulación doble explícita-implícita)	39
Tabla 4-3	Tipos de Análisis realizado con LS-DYNA [ANSYS LS-DYNA User's guide]	48
Tabla 4-4	Tipos de elementos "LS DYNA Explicit"	51
Tabla 4-5	Constantes Reales	53
Tabla 4-6	Parámetros del material Plastic Kinematic	58
Tabla 4-7	Parámetros del material Rigid	59
Tabla 4-8	Parámetros de restricción de desplazamientos	59
Tabla 4-9	Parámetros de restricción de giros	60
Tabla 5-1	Parámetros de la placa	104
Tabla 5-2	Propiedades del modelo Plastic Kinematic para la chapa	105
Tabla 5-3	Parámetros de la Etapa_0	106
Tabla 5-4	Propiedades Rigid Material para las herramientas	106
Tabla 5-5	Vectores Etapa_0	107
Tabla 5-6	Componentes del Conjunto Etapa_1	109
Tabla 5-7	Vectores Etapa_1	109
Tabla 5-8	Vectores Etapa_2	111
Tabla 5-9	Vectores Etapa_2	111
Tabla 5-10	Resultados de la Simulación Etapa 0	117
Tabla 5-11	Mediciones en la pieza real (escaneado) Etapa_0	119
Tabla 5-12	Profundidad y ángulo de embutición de las placas real y simulada, Etapa_0	121
Tabla 5-13	Resultados de la Simulación Etapa_1	126
Tabla 5-14	Mediciones en la pieza real (escaneado) Etapa_1	128
Tabla 5-15	Profundidad y ángulo de embutición de las placas real y simulada, Etapa_1	130
Tabla 5-16	Resultados de la Simulación Etapa 2	137
Tabla 5-17	Mediciones en la pieza real (escaneado) Etapa 2	139
Tabla 5-18	Profundidad y ángulo de embutición de las placas real y simulada	141

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 1 Página: 9
--	--------------------------------------	-------------------------------

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos

El objetivo de este proyecto es la simulación del proceso real de embutición de una chapa que servirá de pieza soporte de la rueda de repuesto de un automóvil. Para ello se ha utilizado el programa de elementos finitos ANSYS y el módulo de simulación LS-DYNA, hasta obtener un proceso de embutición *simulado* que represente con una desviación dentro de los límites aceptables –como se verá en la Sección 5.4- el comportamiento real de la chapa en las distintas etapas.

Por un lado, nos permitirá en un futuro introducir variaciones en los distintos parámetros de dicho proceso sin necesidad de recurrir a intentos de fabricación sucesivos: (i) se podrá estudiar el efecto de disminuir el espesor de la chapa con el fin de aligerar peso en el automóvil y de ahorrar material; (ii) se podrá ver el efecto de la sustitución del material empleado por uno de diferente comportamiento elástico-mecánico; y (iii) se podrá optimizar las velocidades de embutición para disminuir el tiempo de fabricación.

Por otro, se podrá predecir el comportamiento de dicho material en otros procesos de embutición, y anticipar posibles fallos. Son las llamadas *lecciones aprendidas* (*learnt lessons*), que llevarán en un futuro (i) a seleccionar radios de acuerdo adecuados para los troqueles, minimizando así el número de prototipos necesarios, los retoques de los mismos, el consumo innecesario de material y las horas de ingeniería y fabricación necesarias; y (ii) a reducir el número de pruebas necesarias para dar con la velocidad de embutición apropiada para el proceso y el material utilizado.

1.2. Antecedentes

El proceso real de embutición transcurre en cuatro etapas. La primera de ellas fue el objeto de estudio del PFC “Simulación de un proceso de embutición mediante LS-DYNA” [1] y es la que se ha tomado como punto de partida del presente proyecto en cuanto a (i) la geometría de los troqueles y de la placa y (ii) las propiedades del material con excepción del límite de fluencia del mismo, que no era representativo del material real.

1.3. Contenidos


El contenido y orden de aparición de cada uno de los capítulos de este proyecto llevará a un entendimiento paulatino del proceso de simulación, de los objetivos perseguidos con el mismo y de en qué grado se han alcanzado los mismos.

El presente capítulo expone de manera concisa el objetivo del proyecto, y esboza la línea de razonamiento que se seguirá en la extracción de conclusiones y lecciones aprendidas.

Si bien se considera fuera del alcance de este proyecto el desarrollo teórico en profundidad de la Teoría de la Elasticidad subyacente en el Método de Elementos Finitos y de la implementación computacional del mismo, el Capítulo 2 incluye nociones básicas del Método de Elementos Finitos necesarias para interpretar posteriormente los resultados obtenidos.

En el Capítulo 3 se describe el proceso real de embutición de la pieza en el contexto de los procesos de fabricación utilizados en la actualidad y de los materiales asociados a los mismos, mientras que en el Capítulo 4 se detalla la metodología seguida para la consecución de una simulación que lo represente.


El Capítulo 5 recoge de forma ordenada los resultados obtenidos mediante el proceso simulado, para su análisis y posterior extracción de conclusiones y lecciones aprendidas en el Capítulo 6.

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 1</p> <p>Página: 10</p>
--	---	--

El Capítulo 7 invita a la realización de posibles trabajos futuros que complementen el llevado a cabo en este proyecto.

El capítulo 8 agrupa una serie de acrónimos y términos definidos que facilitan la comprensión global del proyecto y el capítulo 9 muestra la lista de referencias bibliográficas utilizadas.

Finalmente se incluyen dos anexos: el Anexo A que contiene la hoja de características del acero empleado en la fabricación de la placa soporte y el Anexo B, el plano de la pieza ya embutida (incluye los punzonados finales que no se van a contemplar en el desarrollo del proyecto).

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 2 Página: 11
--	--------------------------------------	--------------------------------

2. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El Método de los Elementos Finitos es el método numérico más potente aplicable al análisis de estructuras de cualquier tipo, sometidas a solicitaciones mecánicas y térmicas tanto estacionarias como transitorias.

La Teoría de la Elasticidad establece para un problema dado las relaciones matemáticas exactas en forma diferencial, y plantea su integración cerrando el problema con condiciones iniciales y de contorno para obtener las funciones que definen las variables representativas del comportamiento de la estructura. [3]

El Método de los Elemento Finitos se trata de una simplificación de dichas ecuaciones, puesto que su forma diferencial se sustituye por un conjunto discreto de ecuaciones y de sus respectivas condiciones de contorno para su posterior resolución. En función del número de estas ecuaciones será necesario –como en el presente caso- o no implementar el problema para su resolución computerizada. [5]

2.1. El Método de los elementos finitos en medios continuos

La discretización del problema en el caso de un medio continuo se lleva a cabo mediante un proceso de modelización para convertirlo en un número finito de elementos ensamblados entre sí en puntos llamados nodos, el planteamiento de las ecuaciones de desplazamientos para dichos nodos y la imposición de las condiciones de contorno apropiadas en términos de compatibilidad de desplazamiento nodal. [4]

De la resolución del mismo como un todo, se obtendrá el campo de desplazamientos para cada uno de los nodos y, a partir de él y si fuera necesario, el campo de tensiones. [5]

El comportamiento en el interior del elemento se interpolará a partir de los desplazamientos nodales mediante las llamadas funciones de forma.

Según este planteamiento, los errores se deberán principalmente a (i) la aproximación del dominio, (ii) la aproximación del comportamiento en el interior de cada elemento y (iii) la precisión aritmética usada en la resolución del sistema de ecuaciones mediante métodos numéricos. [4]


2.1.1. *Formulación general*

2.1.1.1. Elemento

El subsiguiente desarrollo matemático considerará un elemento genérico e de nodos i, j, \dots , de superficie S^e y volumen V^e . [5]

2.1.1.2. Campo de desplazamientos del elemento

$$\{a^e\} = \begin{Bmatrix} \{a_i\} \\ \{a_j\} \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 2</p> <p>Página: 12</p>
--	---	---------------------------------------

donde $\{a_i\}$ es el vector columna de desplazamientos de cada nodo en coordenadas locales

(ver Figura 2-1), que será de la forma $\{a_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix}$

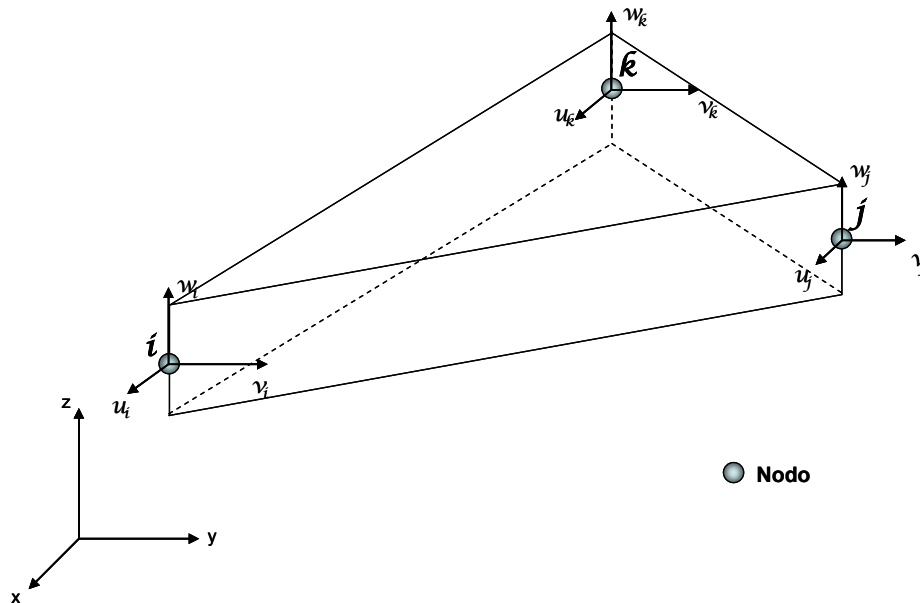


Figura 2-1 Representación esquemática del campo de desplazamientos de un elemento

El campo de desplazamientos del elemento quedará definido por tanto por la relación:

$$\{u(x \ y \ z)\} = [N(x \ y \ z)] \cdot \{a^e\} = \begin{bmatrix} N_i(x \ y \ z) & N_j(x \ y \ z) & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{a_i\} \\ \{a_j\} \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

Donde $[N_i(x \ y \ z)]$, $[N_j(x \ y \ z)]$,... son las denominadas matrices de forma, que se caracterizan por las siguientes propiedades:

Son cuadradas, ya que el número de componentes del vector columna $\{u(x \ y \ z)\}$ es igual al número de componentes en $\{a_i\}$, $\{a_j\}$,....

Cumplen $[N_i(x_i \ y_i \ z_i)] = [I]$ $[N_i(x_j \ y_j \ z_j)] = [0]$ si $i \neq j$ puesto que las funciones de interpolación toman los valores de los desplazamientos nodales en los mismos.

Por lo tanto, si se considerasen las mismas funciones de forma en todas las componentes de $\{u(x \ y \ z)\}$ se deduce que $[N_i(x_i \ y_i \ z_i)] = N_i(x \ y \ z) \cdot [I]$ en donde $N_i(x \ y \ z)$ es la función escalar de forma.

2.1.1.3. Campo de deformaciones del elemento

Las deformaciones se obtienen mediante derivadas parciales de las componentes del corrimiento y en general se escriben de la forma [5]:

$\{\gamma\} = [S] \cdot \{u\} = [S] \cdot [N] \cdot \{a^e\} = [B] \cdot \{a^e\}$ con $[B] = [S] \cdot [N]$ donde $[S]$ es una matriz operacional que incluye las derivaciones parciales adecuadas, como se verá más abajo.

Teniendo en cuenta que $[N] = [[N_i], [N_j], \dots]$ se tendrá:

$$[B] = [S] \cdot [N] = [[S] \cdot [N_i], [S] \cdot [N_j], \dots] = [[B_i], [B_j], \dots] \text{ en donde } [B_i] = [S] \cdot [N_i]$$

2.1.1.4. Campo de esfuerzos del elemento

El campo de esfuerzos $\{\sigma\}$, que contendrá el mismo número de elementos que el campo de deformaciones $\{\gamma\}$, vendrá dado por:

$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\epsilon\} = [D] \cdot \{\gamma\} - [D] \cdot \{\eta\}$ donde $[D]$ es la matriz de rigidez del material y $\{\eta\}$ son las deformaciones térmicas. []

2.1.1.5. Equilibrio del elemento

Suponiendo que existe una distribución de fuerzas volumétricas por unidad de volumen $\{F_v\}$ y que en sus bordes libres –si los tuviese– pueden actuar además fuerzas superficiales por unidad de superficie $\{\phi\}$, se trata de calcular el conjunto de fuerzas nodales $\{s\}$ que permite el equilibrio del elemento (ver Figura 2-2).

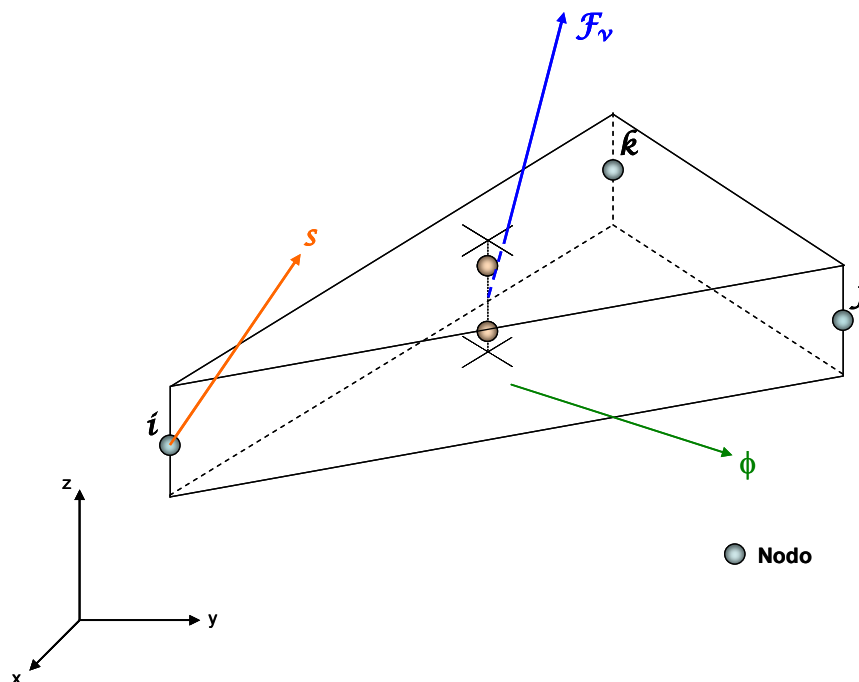



Figura 2-2 Fuerzas que intervienen en el equilibrio de un elemento

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 2 Página: 14
--	--------------------------------------	--------------------------------

Aplicando el principio de los desplazamientos virtuales en correspondencia a un desplazamiento virtual del elemento arbitrario $\{\delta a^e\}$, el campo de desplazamientos de dicho elemento vendrá dado por:

$$\{\delta u\} = [N] \cdot \{\delta a^e\}$$

Mientras que el campo de deformaciones virtuales cinemáticamente consistente con $\{\delta a^e\}$ será:

$$\{\delta \gamma\} = [B] \cdot \{\delta a^e\}$$

De acuerdo con el principio de los desplazamientos virtuales resultará:

$$\{\delta a^e\} \cdot \{s\} + \int_V \{\delta u\}^T \cdot \{F_V\} \cdot dV + \int_S \{\delta u\}^T \cdot \{\phi\} \cdot dS = \int_V \{\delta \gamma\}^T \cdot \{\sigma\} \cdot dV$$

Sustituyendo los valores de $\{\delta u\}$, $\{\delta \gamma\}$ y $\{\sigma\}$ quedará:

$$\{\delta a^e\} \cdot \left[\{s\} + \int_V [N]^T \cdot \{F_V\} \cdot dV + \int_S [N]^T \cdot \{\phi\} \cdot dS - \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot dV \cdot \{a^e\} + \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot \{\eta\} \cdot dV \right] = 0$$

Como la expresión anterior debe verificarse para cualquiera que sea el valor del desplazamiento virtual $\{\delta a^e\}$ que se considere, deberá ser:

$$\begin{aligned} \{s\} &= \left[\int_{V^e} [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot dV^e \right] \cdot \{a^e\} - \int_{V^e} [B]^T \cdot [D] \cdot \{\eta\} \cdot dV^e - \int_{V^e} [N]^T \cdot \{W\} \cdot dV^e - \int_{S^e} [N]^T \cdot \{\phi\} \cdot dS^e = \\ &= [k^e] \cdot \{a^e\} + \{s_0\} - \{p^e\} \end{aligned}$$

Donde $[k^e]$ es la matriz de rigidez del elemento, $\{s_0\}$ son las fuerzas térmicas y $\{p^e\}$ la resultante de fuerzas volumétricas y superficiales en el elemento.

2.1.1.6. Integración del sistema de ecuaciones para el medio continuo

Una vez calculadas las matrices de rigidez de cada uno de los elementos y las resultantes de fuerzas equivalentes en los mismos, es necesario generar las matrices de transformación de coordenadas locales del elemento a coordenadas globales del medio continuo. [5]

Se obtienen así las matrices de rigidez y los vectores de fuerzas equivalentes en ejes globales. Mediante un proceso de ensamblado, se constituirá el sistema completo de ecuaciones con los desplazamiento en los nodos como incógnitas, que se resolverá eliminando los grados de libertad dependientes como consecuencia de las diferentes ligaduras (i.e. los nodos comunes a uno y otro elemento tendrán los mismos desplazamientos).

A partir de sus soluciones y mediante la ecuación $\{\sigma\} = [D] \cdot \{\epsilon\} = [D] \cdot \{\gamma\} - [D] \{\eta\}$ se recuperará el campo de esfuerzos en cada elemento.

2.1.2. Formulación para ANSYS LS-DYNA y discretización mediante elemento tipo Shell 163

2.1.2.1. Elemento Shell 163

Como se verá en el Capítulo 4 sección 4.1.2.1, los requerimientos del proceso de simulación estudiado hacen necesaria la discretización del medio continuo –placa- mediante elementos del tipo Shell 163 de 3 y 4 nodos (ver Figura 2-3).



Por lo tanto, la formulación para ANSYS LS-DYNA considerará elementos genéricos e con 3 nodos i, j, k y elementos genéricos e' con 4 nodos (i, j, k, l) .

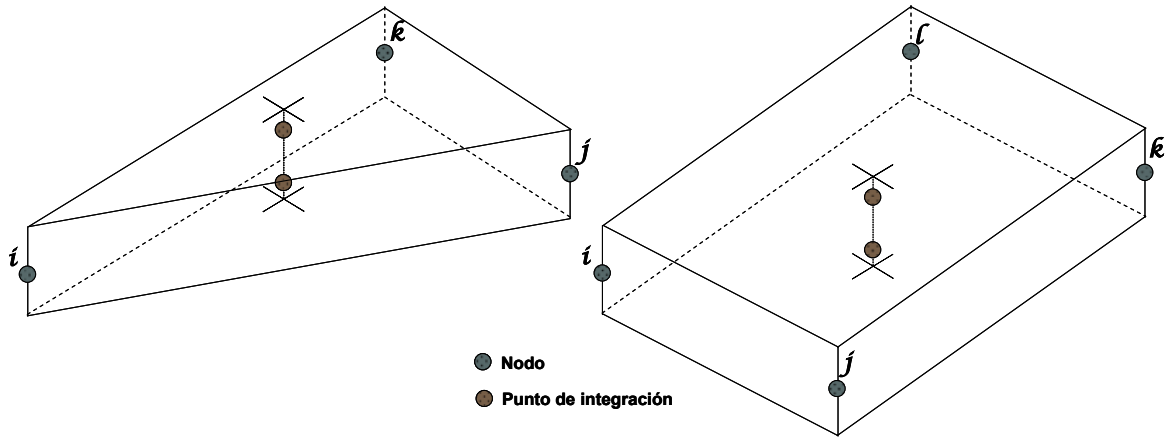


Figura 2-3 Elementos Shell 163 de 3 y 4 nodos

2.1.2.2. Campo de desplazamientos del elemento

Los desplazamientos para este elemento (ver Figura 2-4) vienen dados por las relaciones [2]¹:

$$w(x, y) = \sum_i [N_{wj}(x_i, y_i)] \cdot \begin{Bmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix}$$

$$u(x, y) = \sum_i N_{mi}(x, y) \cdot u_i - z \cdot \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$v(x, y) = \sum_i N_{mi}(x, y) \cdot v_i - z \cdot \frac{\partial w}{\partial y}$$

¹ Basado en la formulación general expuesta en esta referencia.

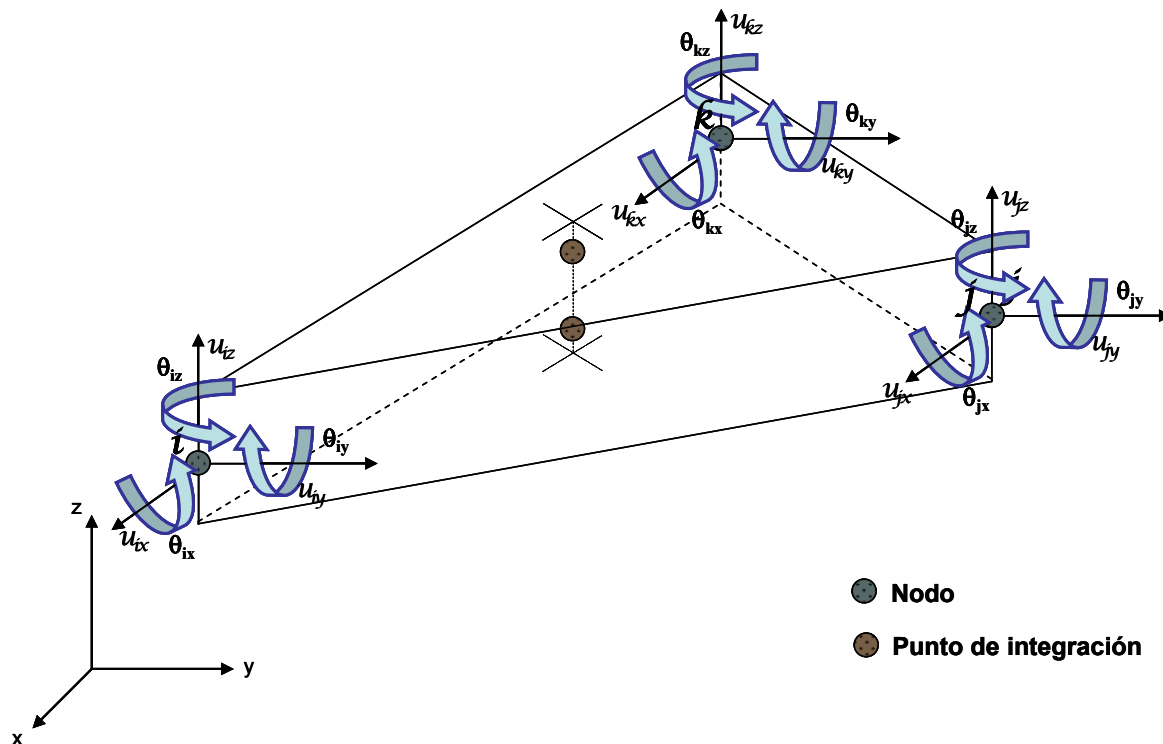


Figura 2-4 Representación esquemática del campo de desplazamientos del elemento

Donde $N_{mi}(x, y)$ son las funciones de forma para los desplazamientos en el plano, que cumplen:

$$N_{mi}(x_i, y_i) = 1 \quad \text{y} \quad N_{mj}(x_i, y_i) = 0 \quad \text{para } j \neq i \quad \text{y}$$


$[N_{wj}(x_i, y_i)]$ son matrices de orden (1,3) que contienen las funciones de forma para desplazamientos fuera del plano:

$$\begin{aligned} [N_{wj}(x_i, y_i)] &= [1 \quad 0 \quad 0] \quad \text{para } j = i & [N_{wj}(x_i, y_i)] &= [0 \quad 0 \quad 0] \quad \text{para } j \neq i \\ \frac{\partial [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial x} &= [0 \quad 0 \quad 1] \quad \text{para } j = i & \frac{\partial [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial x} &= [0 \quad 0 \quad 0] \quad \text{para } j \neq i \\ \frac{\partial [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial x} &= [0 \quad -1 \quad 0] \quad \text{para } j = i & \frac{\partial [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial x} &= [0 \quad 0 \quad 0] \quad \text{para } j \neq i \end{aligned}$$

2.1.2.3. Campo de deformaciones del elemento

A partir del campo de desplazamientos se deducen el campo de deformaciones del elemento, que viene dado por las expresiones [2]²:

² Basado en la formulación general expuesta en esta referencia.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 2 Página: 17
--	--------------------------------------	--------------------------------

$$\varepsilon_x(x, y, z) = \frac{\partial u}{\partial x} = \sum_i \frac{\partial N_i(x, y)}{\partial x} \cdot u_i - z \cdot \sum_i \frac{\partial^2 [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial x^2} \cdot \begin{Bmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix}$$

$$\varepsilon_y(x, y, z) = \frac{\partial v}{\partial y} = \sum_i \frac{\partial N_i(x, y)}{\partial y} \cdot v_i - z \cdot \sum_i \frac{\partial^2 [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial y^2} \cdot \begin{Bmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix}$$

$$\gamma_{xy}(x, y, z) = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \sum_i \frac{\partial N_i(x, y)}{\partial y} \cdot u_i + \sum_i \frac{\partial N_i(x, y, z)}{\partial x} \cdot v_i - 2 \cdot z \cdot \sum_i \frac{\partial^2 [N_{wj}(x_i, y_i)]}{\partial y^2} \cdot \begin{Bmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix}$$

De aquí:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [B_m(x, y)] \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{Bmatrix} + z \cdot [B_w(x, y)] \cdot \begin{Bmatrix} w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \vdots \\ w_n \\ \theta_{xn} \\ \theta_{yn} \end{Bmatrix}$$

2.1.2.4. Campo de esfuerzos del elemento

El campo de esfuerzos para esta formulación verifica la relación descrita para la formulación general [5].

2.1.2.5. Equilibrio del elemento

Aplicando el principio de los Trabajos Virtuales para el elemento (ver Figura 2-5) de forma análoga a la de 2.1.1.5, resultan las expresiones [2]³:

³ Basado en la formulación general expuesta en esta referencia.

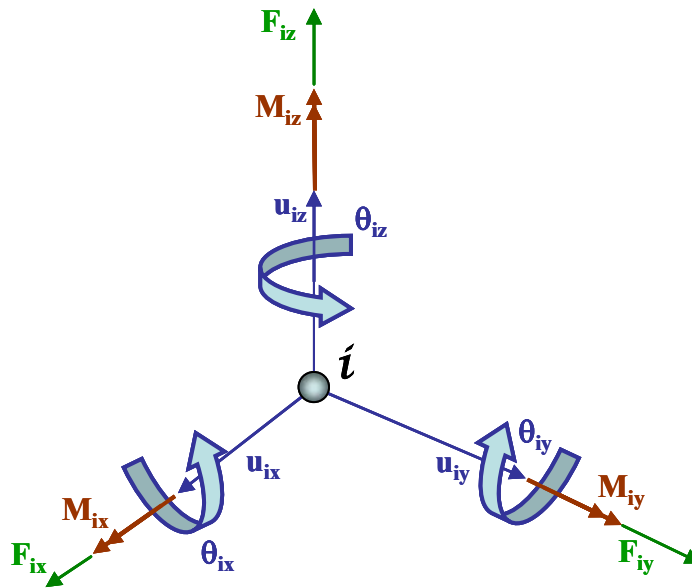


Figura 2-5 Esquema de desplazamientos, giros, fuerzas y momentos en un nodo

$$\begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \end{Bmatrix} = [K_m] \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \end{Bmatrix}_T + \begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \end{Bmatrix}_V$$

$$\begin{Bmatrix} F_{z1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ \vdots \\ F_{zn} \\ M_{xn} \\ M_{yn} \end{Bmatrix} = [K_w] \begin{Bmatrix} w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \vdots \\ w_n \\ \theta_{xn} \\ \theta_{yn} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{z1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ \vdots \\ F_{zn} \\ M_{xn} \\ M_{yn} \end{Bmatrix}_T + \begin{Bmatrix} F_{z1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ \vdots \\ F_{zn} \\ M_{xn} \\ M_{yn} \end{Bmatrix}_V$$

Donde la primera ecuación representa las cargas y desplazamientos en el plano, y la segunda la flexión fuera del plano. Las fuerzas con subíndice T corresponden a las cargas debidas a temperatura y las de subíndice V son las cargas nodales equivalentes a las fuerzas volumétricas. En este caso, debido a la simetría, quedan desacopladas las ecuaciones correspondientes a flexión y las de la placa trabajando en su plano. Reorganizando las ecuaciones, se puede escribir de la forma:




$$\left\{ \begin{matrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{z1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \\ F_{zn} \\ M_{xn} \\ M_{yn} \\ M_{zn} \end{matrix} \right\} = [K_e] \left\{ \begin{matrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \theta_{z1} \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \\ w_n \\ \theta_{xn} \\ \theta_{yn} \\ \theta_{zn} \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{z1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \\ F_{zn} \\ M_{xn} \\ M_{yn} \\ M_{zn} \end{matrix} \right\}_T + \left\{ \begin{matrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{z1} \\ \vdots \\ F_{xn} \\ F_{yn} \\ F_{zn} \\ M_{xn} \\ M_{yn} \\ M_{zn} \end{matrix} \right\}_V$$

2.1.2.6. Integración del sistema de ecuaciones para el medio continuo

Con la formulación detallada en la sección 2.1.2.5, las filas y columnas correspondientes a los giros θ_z son nulas. En algunos modelos, esto puede hacer que la Matriz de rigidez global sea singular. Para evitarlo, existen varias formas de asignar rigideces para estos grados de libertad, que están descritas en la literatura sobre Elementos Finitos.

Una vez solventado este posible inconveniente y resuelto el sistema de ecuaciones, se podrían recuperar los esfuerzos con la relación de la sección 2.1.1.4.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 3 Página: 20
--	--------------------------------------	--------------------------------

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

3.1. Contexto de los procesos de fabricación actuales

3.1.1. La Situación actual del sector automoción

La automoción es uno de los sectores que más dinamismo ha generado en el sistema global de la economía y que más cambios ha experimentado en sus productos finales. Actualmente se trata de desarrollar dentro del “Transporte Sostenible”, basado en los siguientes conceptos: seguridad sin descuidar el confort y las nuevas necesidades de comunicación con los vehículos, sostenibilidad con el medioambiente y eficacia energética, competitividad y beneficio económico. [6]

- Medioambiente y Recursos: el factor medioambiental, obliga a la fabricación de vehículos automóviles más ligeros, de menor consumo y bajo nivel de contaminantes (CO₂, NO_x, etc.). Existen unas estrictas normativas en cuanto a las emisiones de los automóviles, como por ejemplo, el Protocolo de Kyoto de la Convención de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, que obliga a tener en cuenta la posible contaminación del vehículo desde su diseño. Para ello se investiga en nuevos sistemas de propulsión y transmisión de los vehículos más eficaces. Otro factor medioambiental a tener en cuenta, es el posible reciclado de los vehículos fuera de uso, que obliga a las marcas a diseñar de forma que se reduzcan los impactos ecológicos del vehículo desde su concepción hasta su retirada.

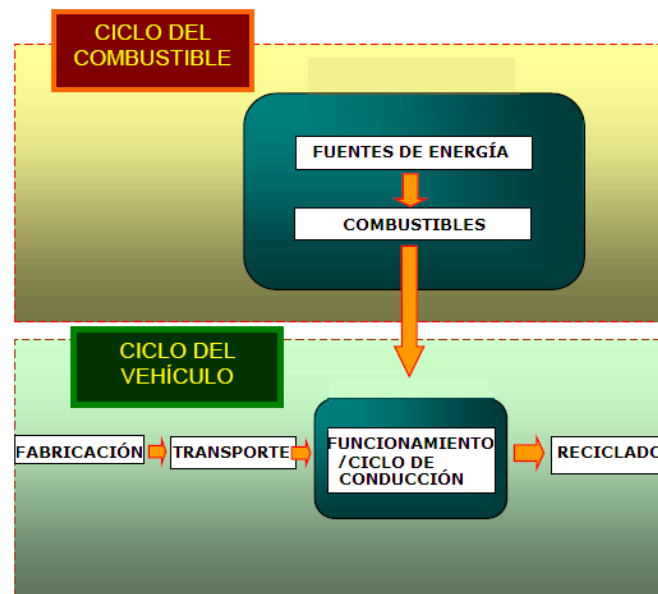



Figura 3-1 Ciclos del Combustible y del vehículo

Actualmente se apuesta por los vehículos híbridos (vehículos de propulsión alternativa movidos por energía eléctrica y un motor de combustión interna) y se investiga en el desarrollo de vehículos de pila de combustible como alternativas a los vehículos actuales de combustión interna.

- Seguridad: El factor de la seguridad, genera unos requerimientos dirigidos principalmente al comportamiento del vehículo y su confort, destacando:

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 3 Página: 21
--	--------------------------------------	--------------------------------

- Mitigación del impacto: (i) Estudio del impacto (comportamiento estructural) y creación de modelos, (ii) Introducción de sensores, materiales y tecnologías del vehículo para atenuar el impacto, (iii) protección de los peatones.
- Prevención: (i) Estudio de los accidentes, (ii) introducción de Sistemas Avanzados de Asistencia a la Conducción, (iii) vehículos especiales (transporte colectivo, discapacitados,...)
- Movilidad: Como por ejemplo sistemas de comunicación con el conductor, sistemas que relacionan el vehículo y la carretera...

En definitiva, se busca:

- Implicaciones en el desarrollo del producto: análisis de factibilidad del desarrollo del vehículo frente al proceso de fabricación.
- Aumentar la sostenibilidad: Aplicación en todas las fases del desarrollo del automóvil y a lo largo de su ciclo de vida, incluyendo el desmontaje, reutilización y valorización del mismo.
- Nuevas tecnologías de fabricación, medios y organización de la producción: Nuevos sistemas de herramientas de gestión y ejecución de la producción.
- Nuevos materiales y sus implicaciones en el diseño y/o producción.

3.1.2. La evolución de los materiales de fabricación

Debido a las exigencias, antes mencionadas y que afectan al diseño de los automóviles, los estudios de I+D+I se han encaminado en la obtención de nuevos materiales que: mejoren las propiedades mecánicas (mayor resistencia), posean buen comportamiento frente a elevadas temperaturas de trabajo (motores, discos de freno) y sean más ligeros (al reducir el peso del automóvil se disminuye el consumo del combustible). [7]⁴


El empleo de nuevos materiales lleva consigo no sólo una adaptación de los procesos de fabricación actuales, si no el desarrollo de nuevos procesos que permitan obtener piezas con los requerimientos establecidos, sin sobredimensionar los mismos por desconocimiento. En los últimos años se ha incrementado la aplicación de materiales compuestos en aplicaciones estructurales debido a su buen comportamiento en cuanto a resistencia mecánica y rigidez, sin disminuir el confort y la seguridad.

De entre los nuevos materiales investigados cabe destacar los siguientes:

- Aceros de Alta Resistencia y Ultra Alta Resistencia.
- Aleaciones ligeras: aluminio, magnesio-titanio.
- Materiales compuestos de matriz orgánica, metálica o cerámica.
- Recubrimientos cerámicos de aleaciones ligeras.

La aparición y el empleo de aleaciones ligeras de magnesio, aluminios y aceros de nueva generación en componentes para el automóvil está produciendo un fuerte impacto tecnológico (desarrollo de nuevos procesos de fabricación), social y económico en las empresas del sector.

⁴ Ver referencia [7] para la información de la sección 3.1.2 y 3.1.3

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 3 Página: 22
--	--------------------------------------	--------------------------------

3.1.3. Estudio comparativo de los nuevos materiales de fabricación

3.1.3.1. Aceros de alta resistencia y ultra alta resistencia

Los aceros de alta y ultra alta resistencia han sido desarrollados con el fin de solucionar los problemas mencionados anteriormente, evitando además que la industria del acero se vea perjudicada en beneficio de otras alternativas, que ofrecen mejores relaciones peso/resistencia.

Actualmente los aceros de alta resistencia y ultra resistencia se utilizan fundamentalmente en componentes de la carrocería, como por ejemplo: Paneles interiores, Paneles externos, Carrocería, Elementos del sistema de suspensión, etc. Los aceros de alta resistencia (HSS) se caracterizan por presentar valores de límite elástico entre 200 y 550 MPa. Por encima de estos aceros, desde el punto de vista mecánico se encuentran los aceros avanzados de alta resistencia mecánica (aceros AHSS, Advanced High Strength Steel o aceros de ultra alta resistencia), cuyo límite elástico es superior a 550 MPa (hasta unos 1200 MPa). Ver también referencia [1].

Las principales razones para contemplar el empleo de aceros de alta resistencia son:

- Resistencia última a la tracción muy elevada, que permite un dimensionado menor para unos mismos requerimientos de seguridad. Este dimensionado menor se traduce en: reducción del peso del componente a diseñar y ahorro de combustible, por un lado, y por otro, mayores consolidaciones de componentes.
- Esta misma resistencia aporta una gran capacidad de absorción de energías al impacto.


Teniendo en cuenta las excelentes propiedades de los aceros de alta resistencia, su aplicación inmediata depende, en gran parte, de la capacidad de la industria de fabricar y conformar componentes compuestos por estos aceros. Su elevada resistencia mecánica conlleva elevados esfuerzos que plantean una serie de retos tecnológicos en los que es necesario combinar: tenacidad, resistencia al desgaste y ciclo de vida. Luego, se hace necesario conseguir, herramientas lo suficientemente duras para no romperse una vez que mecanizan las piezas y lo suficientemente tenaces para poder resistir los impactos elevados.

3.1.3.2. Aleaciones ligeras

El aluminio sigue siendo considerado el material por excelencia para aleaciones ligeras, utilizándose en la fabricación de componentes externos del automóvil, como pueden ser soportes, pistones, carrocería, bloque-motor, etc.

El titanio y las aleaciones de titanio presentan excelentes propiedades en cuanto a resistencia mecánica, baja densidad y elevada resistencia frente a la corrosión y la oxidación. A pesar de estas excelentes propiedades y buen comportamiento del material, se ha restringido su empleo a vehículos de competición y alta gama debido al elevado coste de obtención y procesamiento del mismo. Se investiga, por lo tanto, en el desarrollo de aleaciones y procesos de menor coste, tratando de mantener sus buenas propiedades.

Las aleaciones de Magnesio son los materiales estructurales que presentan la mejor relación resistencia/peso, lo que las hace muy atractivas para su uso en la industria aeroespacial y del transporte. Sin embargo, su uso ha sido limitado, por su baja resistencia a la corrosión, elevada reactividad superficial con otros metales con los que puede reaccionar, mayores espesores que con el aluminio o el acero (debido a los requisitos de resistencia),...

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 3 Página: 23
--	--------------------------------------	--------------------------------

3.1.3.3. Composites

Dentro del grupo de materiales compuestos, cuyo desarrollo ha avanzado especialmente en el sector aeroespacial, el tipo de matriz más utilizado en el sector automoción es el orgánico. Presenta elevada precisión dimensional debido a sus particulares procesos de conformado.

No obstante, cabe destacar también en este sector, los compuestos de matriz metálica (MMC, Metal Matrix Composites), por sus buenas propiedades mecánicas y bajo peso. La matriz suele ser de aluminio.

Los compuestos tienen una característica muy atractiva para los fabricantes en la actualidad: su capacidad de amortiguación del sonido. Requisito imprescindible hoy en día debido a la estricta reglamentación medioambiental, como se comentó anteriormente.

Además de las matrices mencionadas, los desarrollos más innovadores han fabricado piezas con Molibdeno, Cobalto, Titanio y aceros inoxidables como metales base.

Entre sus aplicaciones más usuales se encuentran parachoques, capós, techos, puertas, paneles de carrocería, chasis, llantas, faros...


3.1.3.4. Cerámicos estructurales

Estos materiales son de elevado coste y difícil mecanizado, sin embargo son sin duda los materiales óptimos para resistir esfuerzos continuados a elevadas temperaturas, superiores a los 1000°, temperaturas a las que incluso los aceros empeoran o pierden sus propiedades mecánicas. Como consecuencia, su aplicación más extendida en el sector, es la fabricación de piezas del motor que deben trabajar a elevadas temperaturas, como los cilindros y émbolos, que siendo fabricados de material refractario pueden prescindir de sistema de refrigeración.

A continuación, se muestran una tabla comparativa de los distintos materiales estudiados. No obstante, el factor determinante a la hora de tomar decisiones acerca del material elegido para cada componente, sigue siendo el coste no sólo del propio material, sino también de los procesos de fabricación necesarios para la obtención del producto. Por tanto, de entre aquellos que permitan alcanzar los requisitos de diseño, la elección será un compromiso entre reducción de costes y nivel de calidad ofrecido.

PROPIEDAD	MATERIAL					
	ALUMINIO	MAGNESIO	TITANIO	AHSS	MATERIALES COMPUESTOS	CERÁMICOS
Resistencia	Buena	Buena	Buena	Muy Buena	Buena	Mala
Ligereza	Buena	Muy Buena	Muy Buena	Regular	Buena	Buena
Reciclaje	Muy Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Malo	Regular
Procesabilidad	Buena	Regular	Buena	Buena	Regular	Regular
Corte	Bueno	Bueno	Bueno	Regular	Bueno	Malo
Resistencia a corrosión	Buena	Buena	Muy Buena	Buena	Muy Buena	Muy Buena
Aislamiento Acústico	Malo	Malo	Malo	Malo	Bueno	Malo
Aislamiento Térmico	Malo	Malo	Malo	Malo	Bueno	Muy Bueno

Tabla 3-1 Comparación cualitativa de los materiales

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 3 Página: 24
--	--------------------------------------	--------------------------------

3.1.4. Evolución de los procesos de diseño y fabricación

La aparición en la industria de estos nuevos materiales, ha obligado a los fabricantes a replantear los procesos de diseño, dando lugar a los conceptos de diseño integral e ingeniería concurrente: la pieza se desarrolla a partir de unos requerimientos funcionales, y de sus procesos de fabricación. Esto se debe a la complejidad de tratamiento de algunos de estos materiales, y al nivel de tolerancias exigido. Ver referencias [7] y [11].

Un factor clave en el desarrollo de los componentes son los costes de diseño de los útiles de fabricación y la maquinaria necesaria, además del coste de los ensayos necesarios para lograr la obtención tanto de la pieza final como de los útiles y herramientas (generalmente los procesos se optimizan a partir de continuas pruebas y errores).

Este condicionante ha motivado a las empresas a buscar métodos de reducción del número de ensayos: la finalidad es lograr por medio de estudios teóricos una aproximación válida al comportamiento de los distintos elementos involucrados en el proceso de fabricación; entran en juego en este momento las simulaciones por medio de software.

3.2. Descripción del proceso de fabricación

La fabricación de la pieza real de soporte objeto de estudio de este proyecto, se realiza mediante procesos de conformado por deformación plástica, en este caso se trata de una serie de procesos de embutición seguido de un punzonado al final del proceso.

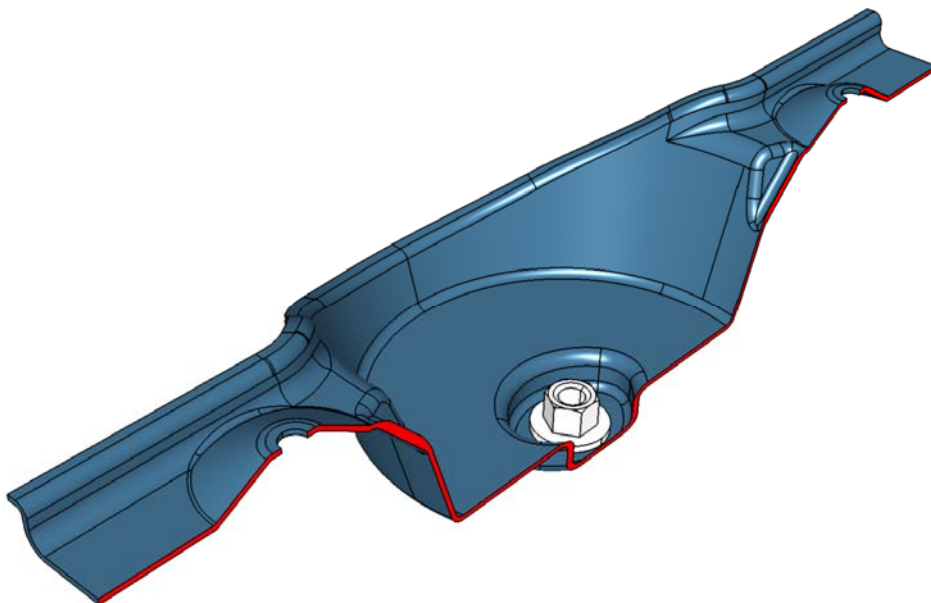



Figura 3-2 Pieza final que incluye el punzonado

La conformación de piezas por deformación utiliza las propiedades plásticas de los materiales para obtener deformaciones permanentes. En determinadas operaciones, el material es llevado hasta el límite de cizalladura produciendo un corte de silueta en la chapa, que da lugar a una pieza de contornos interiores y/o exteriores específicos. [8]

En esta clase de procesos, la temperatura, es un factor determinante, debido a que cuanto mayor es la temperatura del proceso, menor será el esfuerzo necesario que habrá que realizar para superar el límite de fluencia del material y, por lo tanto, mayor será su ductilidad. Por este motivo, algunos procesos de conformado se llevan a cabo en caliente, con temperaturas inferiores al límite de fusión.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 3 Página: 25
--	--------------------------------------	--------------------------------

3.2.1. Tipos de procesos de conformado por deformación plástica

3.2.1.1. Laminado

La laminación es un proceso de conformado por deformación que consiste en hacer pasar un material de partida, llamado lingote, entre unos rodillos, dándoles sucesivas pasadas hasta obtener la chapa del espesor o el perfil de la forma requerida. Se puede realizar tanto en frío como en caliente. [8]

La siguiente figura muestra esquemáticamente el desarrollo de un proceso de laminación:

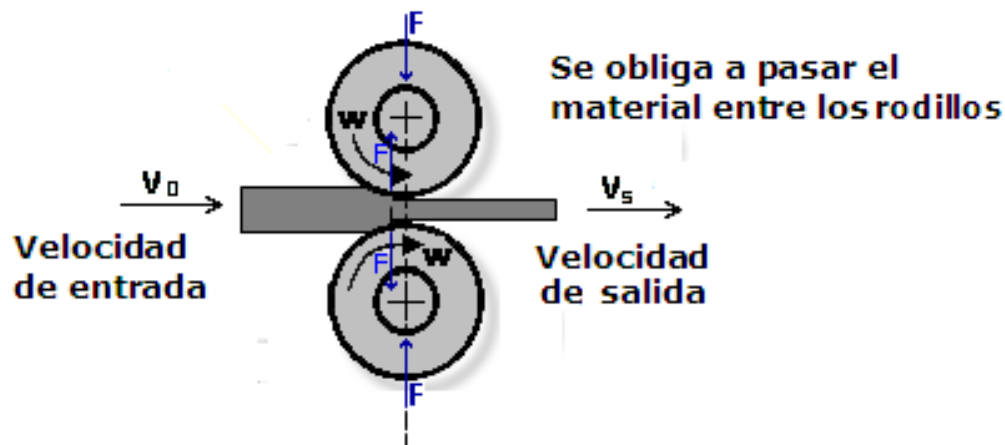


Figura 3-3 Proceso de Laminación: Fuerzas aplicadas


Debido a la reducción de sección en la zona de laminación, la velocidad del material aumentará pasando de su valor de entrada V_0 a un valor V_s de salida. Como la velocidad superficial de los rodillos es constante, habrá deslizamiento entre el material laminado y los rodillos a lo largo del arco de contacto. En un punto de esa zona de contacto, zona de no-deslizamiento, la velocidad del material es igual a la velocidad superficial del rodillo. El rodillo se mueve a mayor velocidad que el material en la parte a la izquierda de ese punto y a velocidad menor en la parte derecha. Esas diferencias de velocidad generan fuerzas de fricción de sentido opuesto. La composición de esos esfuerzos da lugar a una fuerza resultante de fricción.

3.2.1.2. Forja y Extrusión

▪ Forja:

Consiste en la aplicación de esfuerzos de compresión sobre un material en tiempos cortos, a diferencia de los de laminación que suelen ser más lentos, sea por impacto o por presión gradual entre dos matrices que, a su vez, pueden ser [9]:

- Matriz abierta o libre: Se trata de superficies planas entre las que el metal puede fluir lateralmente. Se limita a reducir el espesor de la pieza, no proporciona una forma final.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 3 Página: 26
--	--------------------------------------	--------------------------------

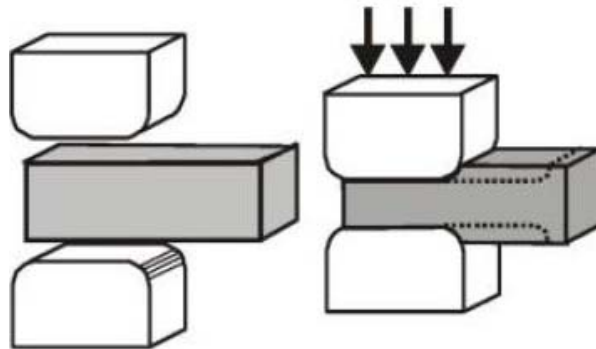


Figura 3-4 Forja en matriz abierta o libre

- Matriz de impresión o Estampa: Tiene una forma determinada, a la que se adapta la pieza al deformarse. Se obtienen formas finales, aunque normalmente aparecen rebabas que deben ser eliminadas.

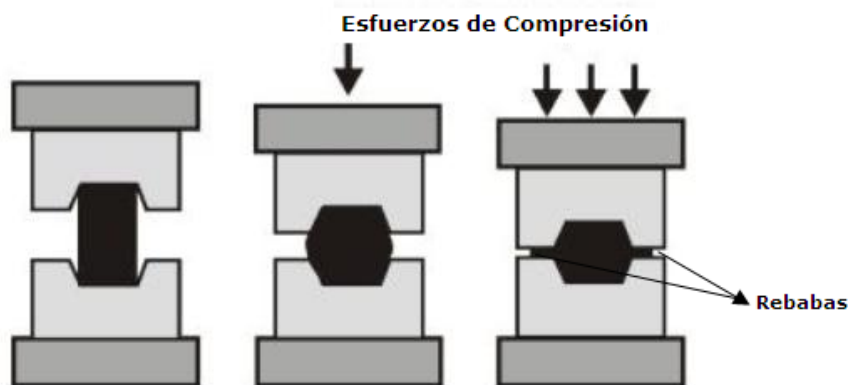


Figura 3-5 Forja en estampa

- Matrices cerradas: Tienen paredes que restringen totalmente la deformación del material. En este caso no se generan rebabas. En este caso, el diseño de las matrices requiere un control preciso del volumen de material, que ha de adaptarse al volumen de la cavidad.

- Extrusión:

Se hace pasar el sólido por la abertura de una herramienta mediante un esfuerzo de compresión posterior, reduciendo su sección y adoptando la forma de la abertura (perfil). Se puede realizar en frío o en caliente. A continuación se explican brevemente algunos tipos de extrusión [9]:

- Directa: el material fluye en la misma dirección y sentido en que se ejerce la fuerza de compresión.

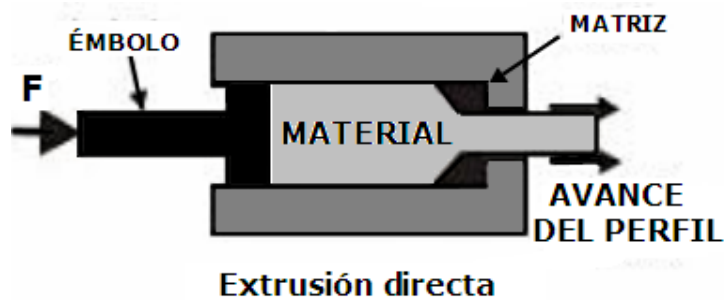


Figura 3-6 Procesos de extrusión directa e inversa

- Inversa: el material fluye en sentido contrario a la fuerza aplicada. La matriz es poco profunda, y el punzón es bastante esbelto. Como el material no tiene movimiento relativo contra la matriz, el rozamiento y la generación de calor es menor. Se utiliza fundamentalmente para la fabricación de tubos de aluminio.

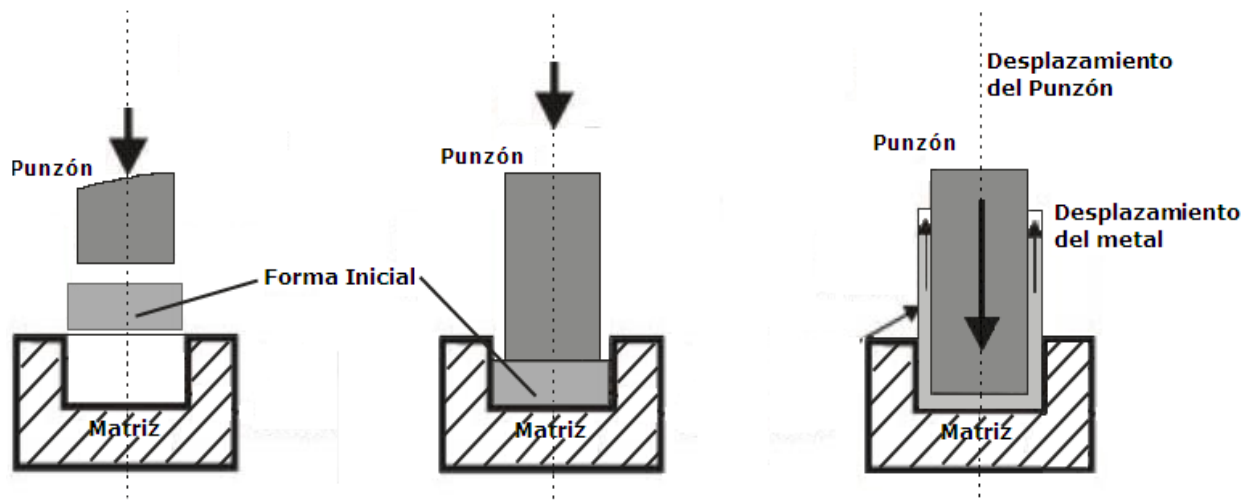



Figura 3-7 Extrusión inversa por choque

- Extrusión por impacto: Se realiza a velocidades superiores que la extrusión convencional. En estos procesos, el material fluye plásticamente por la holgura existente entre el punzón y las paredes de la matriz, tanto en la dirección de aplicación del esfuerzo (hacia delante) como en retroceso. Esta técnica se realiza principalmente en materiales con gran capacidad de fluencia.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 3 Página: 28
--	--------------------------------------	--------------------------------

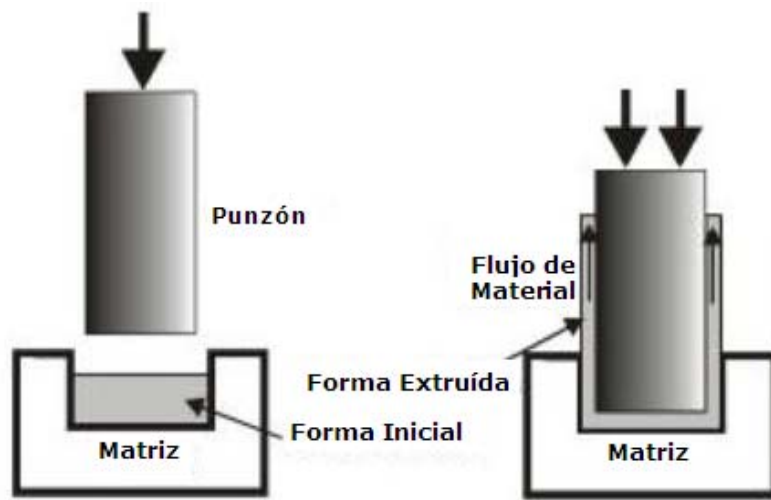


Figura 3-8 Extrusión por impacto

3.2.1.3. Punzonado y corte de las chapas

El punzonado es una operación mecánica con la que, mediante herramientas aptas para el corte, se consigue separar una parte metálica de otra obteniéndose instantáneamente una figura determinada [1].

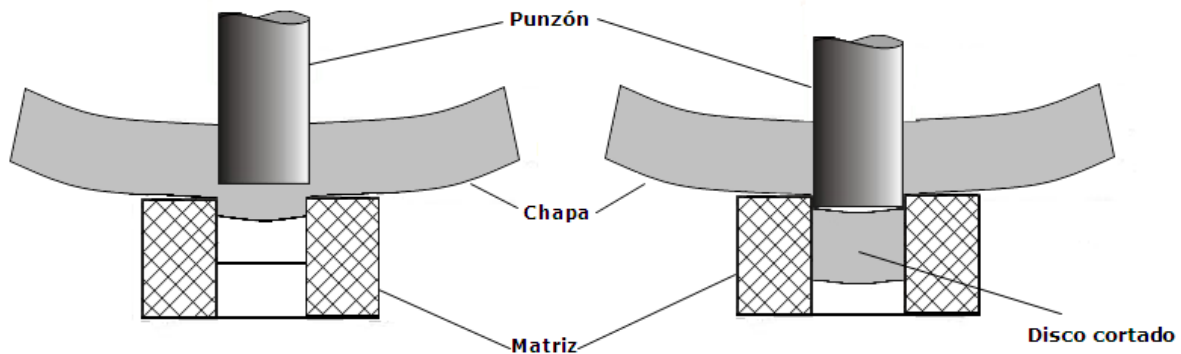



Figura 3-9 Chapa sometida a operación de corte

3.2.1.4. Plegado

En el plegado de chapa, como en todo proceso de conformación por deformación plástica, se obtienen deformaciones permanentes que obligan al material a superar su límite elástico. El doblado de chapa en prensa forma un ángulo diedro, de arista más o menos redondeada. Se pueden obtener con este procedimiento una amplia variedad de trabajos. [8]

La deformación del material se produce a través de un eje recto. En estos casos, el material conserva su forma una vez retirada la fuerza que generó la deformación, salvo la recuperación elástica ("springback"). Además su sección mantiene prácticamente las dimensiones.

En ocasiones, las etapas de doblado dentro de un proceso de conformado, requieren de un precalentamiento de la pieza, que facilite la fluencia del mismo. Los esfuerzos generados en la zona curvada son de tracción en la cara externa del giro, y de compresión en la cara interna;

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 3 Página: 29
--	--------------------------------------	--------------------------------

razón por la que se producen simultáneamente aumentos de sección y estricciones, conservando no obstante la pieza su sección original.

Máquinas empleadas:

- Plegadora: Prensa (excéntrica o hidráulica) especialmente diseñada para la realización de operaciones de plegado. Estas operaciones se caracterizan porque la matriz es rectilínea y de gran longitud. Esto implica una prensa, una mesa estrecha y una estructura típica de prensa en consecuencia.
- Dobladoras: Las dobladoras permiten realizar pliegues en chapas sujetándolas con un pisador situado en la mesa, mientras un macho obliga a la chapa a doblarse hasta el ángulo deseado.

3.2.1.5. Estirado

Se reduce una sección transversal de diámetro D_0 hasta D_f cuando se tira del material a través de una matriz troncocónica denominada “hilera”. Las características del proceso son similares a las de la extrusión. Sin embargo este tipo de proceso se realiza siempre en frío. [9]

El proceso de estirado se puede realizar en varias pasadas, obteniendo alambre que pueden enrollarse en bobinas. En general, el producto final obtenido mediante este proceso es del tipo: barras, bobinas o alambres.

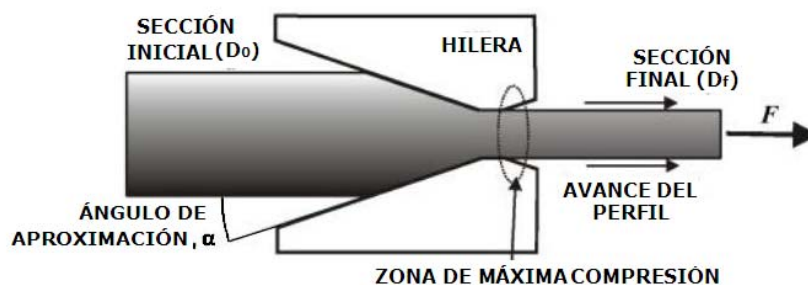


Figura 3-10 Proceso de Estirado

3.2.2. El proceso de embutición


3.2.2.1. Descripción del proceso de embutición

Por tratarse del proceso utilizado para la fabricación de la pieza objeto de este estudio, se expone a continuación una descripción más detallada de la embutición, que del resto de procesos mencionados en esta sección. [8]

Se trata de un proceso de conformado de láminas metálicas más común existente en la actualidad. Utilizando una matriz o estampa se forma un cuerpo hueco mediante estirado, a partir de una chapa plana cortada a medida. En función de la profundidad de embutición, ésta puede ser:

- Estirado único.
- Estirados sucesivos.

En el conformado de chapas mediante embutición, aunque pueda generarse una ligera variación en el espesor de la chapa, no es éste uno de los objetivos perseguidos.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 3 Página: 30
--	--------------------------------------	--------------------------------

La fricción es un factor a tener en cuenta, ya que el material se desliza en la abertura entre el punzón y la matriz. Por lo tanto esta área debe estar pulida y lapeada. Esto reduce la carga necesaria para el desarrollo del embutido. El achaflanado de los bordes de la matriz ayuda a la chapa a resbalar por la pared del agujero, facilitando la operación. Facilitan también el embutido la lubricación adecuada, de la chapa y de la herramienta en su conjunto.

El juego que queda entre el punzón y la matriz de embutir tienen que ser mayor que el espesor de la chapa. Se pueden tomar referencias para las holguras de 1,12 a 1,30 veces el espesor de la chapa para el latón, de 1,08 a 1,20 para el aluminio...

3.2.2.2. Herramientas empleadas

El proceso de embutición utilizado para la fabricación de la pieza soporte, consta de las siguientes herramientas [10]:

- Punzón: elemento que obliga al material a pasar por un espacio definido por el mismo y la matriz.
- Matriz: elemento que funciona a modo de molde. Cuando el punzón desplaza la chapa hacia la matriz, el material de la chapa fluye siguiendo los bordes de las paredes de la matriz, cuya forma, exceptuando la recuperación elástica del material, ha de ser igual a la forma final deseada del hueco de la chapa.
- Pisachapas (sujetachapas): elemento que tiene únicamente la función de sujetar la chapa objeto del conformado durante todo el proceso, con la finalidad de que no se formen pliegues.

No obstante, si bien todos los troqueles se componen de estas herramientas básicas, su complejidad varía notablemente dependiendo del proceso de fabricación.

3.2.2.3. Tipos de procesos de embutición

3.2.2.3.1. Embutido de efecto simple

La preforma que se va a embutir se fija en su asiento, el punzón comienza a empujar el material en la matriz y finalmente se expulsa la pieza embutida por acción de un expulsor, obteniéndose una pieza de esta característica. [8]

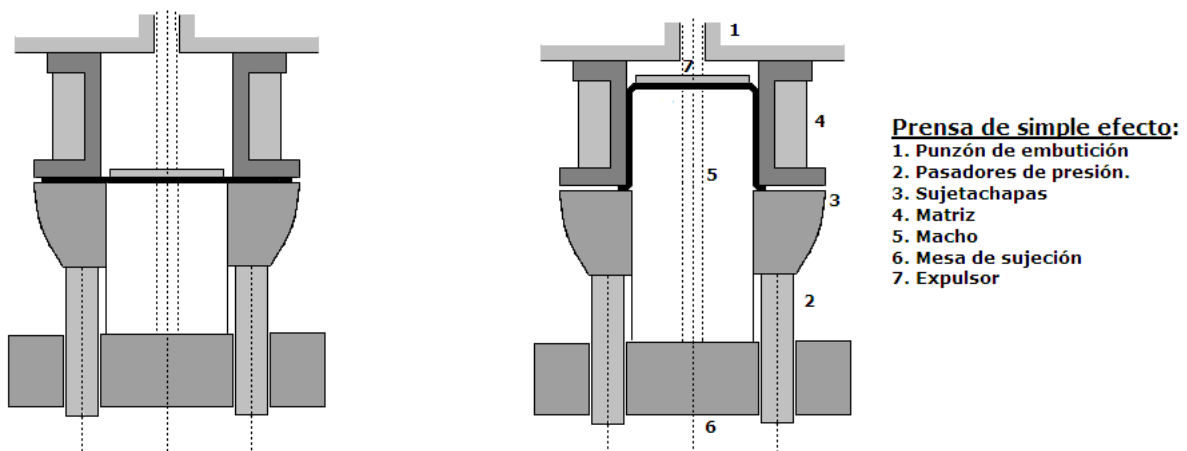



Figura 3-11 Prensas de Simple efecto

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 3 Página: 31
--	--------------------------------------	--------------------------------

3.2.2.3.2. Embutido de doble efecto

En este tipo de embutido, el punzón se sitúa en la parte superior de la prensa, la preforma se coloca en el asiento de la matriz y el conjunto punzón-placa-prensa actúan simultáneamente. En este caso la matriz también dispone de un expulsor. [8]

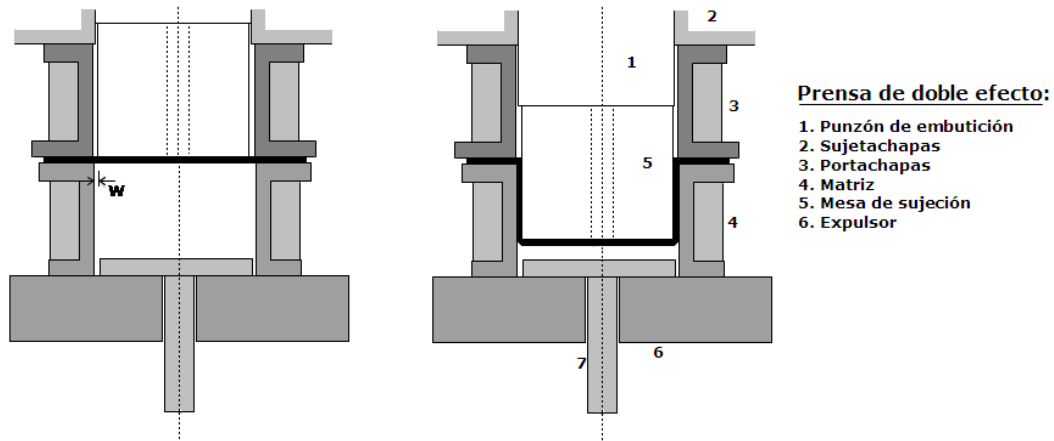


Figura 3-12 Prensas de doble efecto

3.2.2.3.3. Embutición Inversa

La embutición inversa ofrece la posibilidad de ahorrar una o dos etapas de embutición. Con éste tipo de embutición la pieza previamente embutida se dispone con la abertura hacia abajo sobre una matriz negativa de embutir. El punzón, que desciende sobre la pieza así dispuesta la vuelve de forma que la superficie interior se convierte en superficie exterior de la misma. De este modo se obtiene con una herramienta profundidades mayores que con la embutición corriente. Por lo general no se necesita ningún dispositivo pisador. [10]

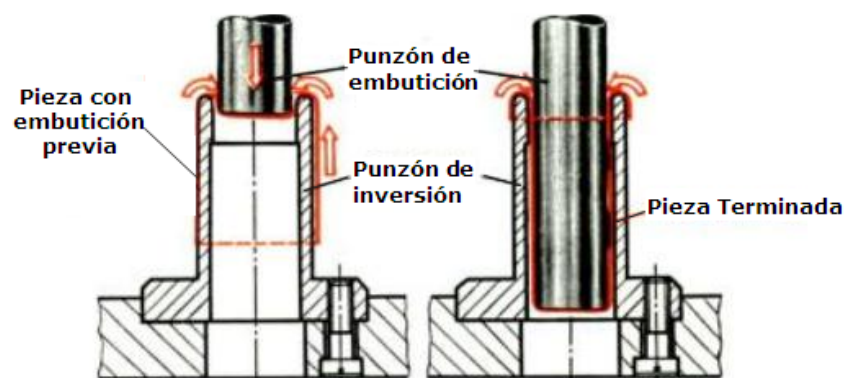



Figura 3-13 Embutición Inversa

La embutición negativa se emplea casi exclusivamente para piezas cilíndricas o piezas redondeadas no cilíndricas por ejemplo carcasas de faro o proyectores. Para piezas irregulares resultaría muy dificultosa la ejecución de las aberturas en la matriz invertida.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 3 Página: 32
--	--------------------------------------	--------------------------------

A continuación, y continuando con el proceso de embutición, se presenta una introducción a la construcción de herramientas y los ensayos que conllevan. De forma que se tenga una noción de los parámetros que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar los troqueles.

3.2.2.4. Fabricación de herramientas para embutición profunda

La fabricación de las herramientas de embutición como: el punzón y la matriz o estampa se realizan mediante procesos de torneado, fresado, limado, amolado o por medio de la erosión por chispas.

Las aberturas en las matrices de embutir, los redondeamientos de las aristas de embutición, así como las superficies de deslizamiento de la matriz y del pisachapas tienen que estar bien alisadas.

La magnitud de los redondeamientos en las aristas de la matriz de embutir depende del espesor de la chapa y de la diferencia entre el diámetro del disco y el de la embutición. La magnitud estos redondeamientos son valores experimentales que pueden tomarse de tablas existentes. No obstante, la magnitud de los redondeamientos puede determinarse de forma experimental. Para ello se dejan, en la matriz sin templar, los radios relativamente pequeños, de forma que si las piezas de las embuticiones de prueba se rompen cerca del fondo, la causa será generalmente el haber elegido un radio muy pequeño en las aristas de embutición. Los redondeamientos demasiado grandes se reconocen por la formación de arrugas en el borde superior de las paredes porque entonces el pisador no sujeta con firmeza la chapa durante el suficiente tiempo.

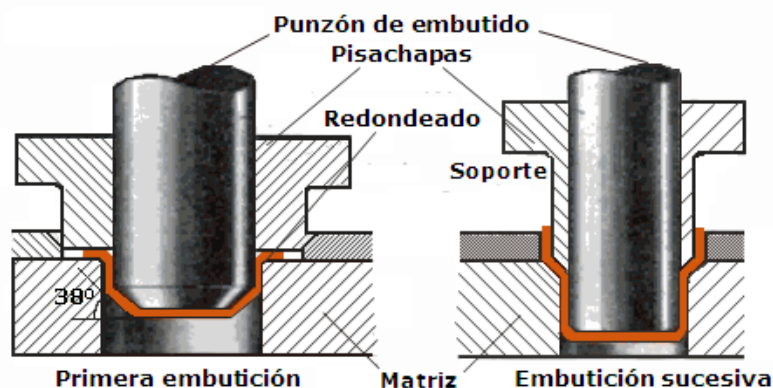



Figura 3-14 Punzones y dispositivos de sujeción para la primera y sucesivas embuticiones

El pisachapas debe tener en la primera etapa una superficie plana precisamente en la zona por la que oprime a la chapa. En las siguientes operaciones, debe adaptarse a la pieza ya embutida.

Al separar la pieza embutida del punzón se produce entre la superficie frontal del punzón y la superficie interior del fondo de la pieza una cámara con aire enrarecido. Con objeto de que la presión del aire exterior no pueda ocasionar abolladuras en el fondo, en el caso de chapas delgadas y grandes superficies de fondo, se taladra en el punzón un agujero a través del cual pueda penetrar aire.

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 3</p> <p>Página: 33</p>
--	---	---------------------------------------

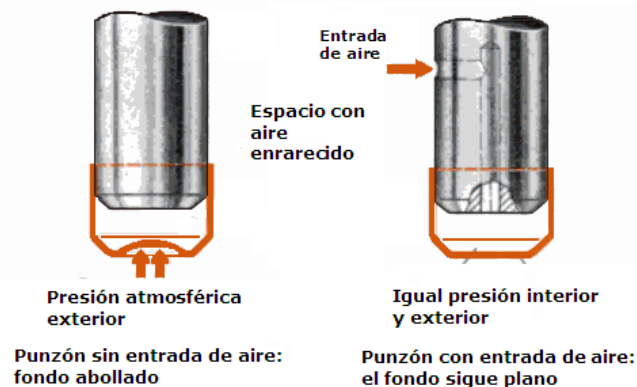


Figura 3-15 Taladro en el punzón de embutir

3.2.2.4.1. Ensayos para las herramientas de embutición profunda:

El ensayo de las herramientas de embutición exige mucha práctica porque la aparición de piezas defectuosas puede provenir de muy diversas causas. Como la velocidad de embutición es de importancia decisiva para el correcto trabajo de una máquina de embutir, debe emplearse en los ensayos la misma prensa que se va a utilizar posteriormente en la fabricación. [10]

Uno de los parámetros que hay que ajustar es la holgura entre el punzón y la matriz. Para ello se hacen diversas pruebas con chapas dobladas en ángulo recto y espesor igual a la holgura que se pretende obtener.

Si en los ensayos las chapas se rompen cerca del fondo se puede deber a diversas causas, como por ejemplo: la holgura es demasiado estrecha, el redondeamiento en la matriz o el punzón es demasiado pequeño, la velocidad de embutición es demasiado grande, la presión que ejerce el dispositivo de sujeción es excesiva también, etc.

Si en el borde superior de las paredes se presentan pliegues verticales se puede deber a que: la rendija de embutición es demasiado ancha, el redondeamiento en la matriz demasiado grande, la presión del pisachapas demasiado pequeña.


Si las piezas embutidas se rasgan de modo horizontal justo encima del fondo de la pieza y las esquinas se han estirado más que los lados, habrá que dejar el recorte más libre, más ahuecado, en las zonas correspondientes.

Las grietas verticales en los ángulos del borde superior de la pieza significan que hay falta de material en esos sitios. Pueden ser también debidos a redondeamientos demasiado pequeños.

3.2.3. Descripción del proceso de fabricación de la pieza en estudio

La simulación por ordenador de los pasos realizados en la fabricación de la pieza de soporte de la rueda de repuesto de un automóvil, es el objeto de estudio de este proyecto. Es necesario tener claros los pasos que se van a seguir en la realidad para la construcción no sólo de la geometría 3D si no para la propia definición de las etapas.

A continuación se presenta un breve resumen de los pasos seguidos en la fabricación real de la pieza. Se trata de cuatro embuticiones seguidas de un punzonado, que no se estudiará en este proyecto.

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 3</p> <p>Página: 34</p>
--	---	---------------------------------------

Embutición

Etapas 0: Primera Embutición

La primera embutición de unos 16 mm de profundidad se realiza en una prensa distinta a la que comete las tres siguientes. Se trata de una operación previa necesaria, para evitar que la placa rompa si se embute directamente desde lo que es ahora la segunda Etapa.



Figura 3-16 1ª Operación de embutición de la Pieza de soporte de la rueda de repuesto

Etapas 1: Segunda Embutición

Esta embutición tiene unos 18 mm de profundidad y se realiza como segunda etapa en una prensa en la que se cometerán las próximas operaciones de conformado. Como se puede ver la zona central de la placa se deforma perfectamente, gracias a la primera embutición realizada.



Figura 3-17 2ª Operación de embutición de la Pieza de soporte de la rueda de repuesto

Etapas 2: Tercera Embutición

En esta tercera etapa se realiza una embutición de unos 63 mm de profundidad. Como se puede ver, se obtiene prácticamente la forma definitiva de la pieza, sólo que con una forma más suave que la final.


	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 3</p> <p>Página: 35</p>
--	---	---------------------------------------



Figura 3-18 3ª Operación de embutición de la Pieza de soporte de la rueda de repuesto

Etapas 3: Cuarta Embutición

Última embutición, con la que se obtiene la forma final de la pieza a falta del punzonado. La profundidad de embutición no varía con respecto a la anterior, pero se puede ver cómo tiene una forma más definida.




Figura 3-19 4ª Operación de embutición de la Pieza de soporte de la rueda de repuesto

Etapas 4: Punzonado

En la quinta Etapa se realiza un punzonado para que pueda ser anclada al automóvil.



Figura 3-20 5ª Operación: Punzonado de la Pieza de soporte de la rueda de repuesto

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 36
--	--------------------------------------	--------------------------------

4. METODOLOGÍA

4.1. La herramienta ANSYS y el módulo LS-DYNA

ANSYS Inc. fundada en 1970 (Swanson Analysis Systems, Inc.), desarrolla y presta soporte a la ingeniería introduciendo nuevos métodos para conseguir productos y procesos de fabricación más innovadores – logrando una reducción tanto de los costes como del tiempo invertido hasta la comercialización del producto – con programas de elementos finitos destinados a la simulación, que predicen cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. [1]

ANSYS es un programa de elementos finitos que originalmente ofrece soluciones para resolver análisis estáticos lineales. Sucesivamente se han ido introduciendo módulos con los que este programa es capaz de resolver además problemas dinámicos no lineales. Los principales módulos de ANSYS son: Multiphysics, Mechanical, Structural, Professional, Design Space, Emag (simulaciones Electromagnéticas), Paramesh (mallas adaptativas), LS-DYNA y Educational. [18]

ANSYS LS-DYNA surge de la colaboración entre ANSYS, Inc. y Livermore Software Technology Corporation (LSTC), introduciendo en 1996 las herramientas robustas de LS-DYNA para resolver problemas complejos de diseño. Incluye, elementos explícitos 2D y 3D, análisis automático de contactos (superficie única, superficie a superficie y nodo a superficie), decenas de modelos de material y ecuaciones constitutivas, así como una gran cantidad de posibilidades de simulación.

Ante fenómenos que ocurren a elevada velocidad como pueden ser los impactos, colisiones o procesos que sufren grandes deformaciones, estampado o conformado, se exige un conocimiento muy amplio y profundo de los fenómenos físicos que se producen así como de los modelos matemáticos empleados: ecuaciones constitutivas, leyes de comportamiento del material, resolución de la propagación del efecto en el modelo analizado, etc.

4.1.1. Métodos de resolución de ambas aplicaciones

■ ANSYS (método de resolución implícito) y LS-DYNA (método de resolución explícito)

ANSYS y LS-DYNA proporcionan soluciones a procesos de muy distinta naturaleza y con métodos de resolución diferentes [1], [16], [18]:

- **ANSYS:** Es un programa de elementos finitos que da solución a procesos implícitos, es decir, resuelve sistemas estáticos/cuasi-estáticos (fuerzas aplicadas en grandes lapsos de tiempo) en los que el sistema se comporta de forma lineal. Se resuelve en una sola iteración, definida a partir de intervalos grandes de tiempo, ya que la soluciones convergen fácilmente mostrando una gran estabilidad. De manera que utiliza pocos recursos computacionales.
- **LS-DYNA:** Resuelve procesos explícitos, es decir, problemas dinámicos en los que se producen problemas de impactos, de contactos entre superficies, grandes deformaciones y múltiples no-linealidades. Como la solución explícita depende del tiempo (el tiempo total del transcurso del proceso se divide en intervalos muy pequeños), el sistema debe resolverse completamente (campos de tensión y de deformación) para cada intervalo de tiempo hasta llegar a completar el tiempo total de la simulación. Exige, por lo tanto, muchos recursos y tiempo de CPU para llegar a

una solución, cuyo grado de convergencia depende del número de intervalos en que se haya dividido el tiempo total.

- **ANSYS LS-DYNA:** Combina el motor de resolución de procesos explícitos de LS-DYNA con las capacidades del pre-procesado y post-procesado de ANSYS. De forma que desde el pre-procesador se podrá generar/importar la geometría, obtener la solución dinámica explícita (se trata en este caso de un proceso de embutición) y los resultados desde el post-procesador de ANSYS. A continuación, se presenta un esquema que trata de reflejar los pasos realizados en cada módulo del programa:

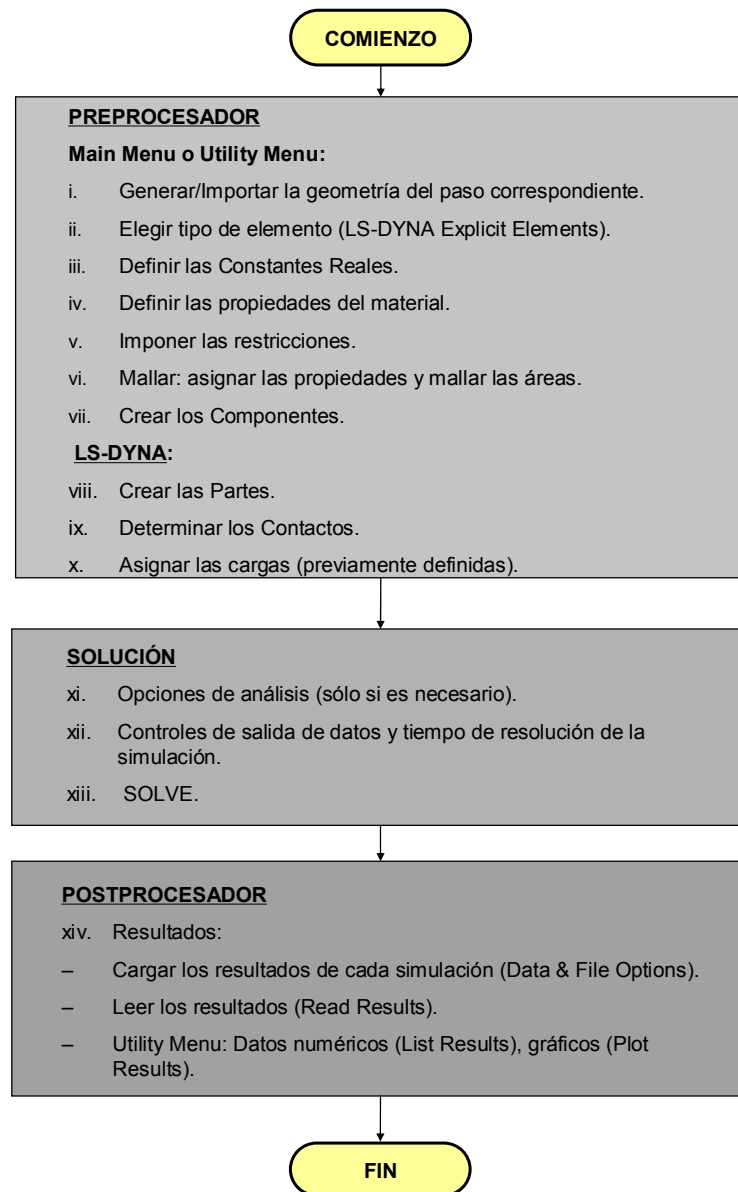



Figura 4-1 Simulación explícita Simple: Pasos Realizados

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 38
--	--------------------------------------	--------------------------------

Se podría, por lo tanto, resolver un problema implícito de forma explícita siempre que no importe el aumento de tiempo y de recursos computacionales. De la misma forma se podría obtener la solución de un problema explícito de forma implícita, lo que supone la pérdida de precisión a la hora de resolverlo ya que no refleja el proceso real (solución de un problema dinámico sobre la base de un movimiento estático), las posibles deformaciones generadas durante el proceso, etc. Como ventaja se podría destacar la velocidad de resolución, que sería mucho mayor.

La siguiente tabla comparativa resume las ideas mencionadas en los párrafos anteriores de forma que se puedan comparar los principales aspectos de la metodología de trabajo con las tres herramientas [1], [12] y [13]:

	ANSYS	LS-DYNA	ANSYS LS-DYNA
Soluciones	– Implícitas	– Explícitas	– Implícitas-explícitas. – Explícitas-implícitas.
Tipo de problema	– Estáticos/Cuasi-estáticos.	– Dinámicos.	– Estáticos y dinámicos.
Comportamiento del sistema	– Lineal.	– No lineal.	– Lineales y no lineales.
Duración del proceso	– Fuerzas aplicadas durante largos lapsos de tiempo.	– Fuerzas aplicadas durante cortos lapsos de tiempo.	– Dependen del proceso.
Tiempo y recursos de CPU	– Corto. – Pocos recursos.	– Muy largo. – Gran cantidad de recursos.	
Resolución	– Una iteración. – Δt muy grandes. – Gran estabilidad.	– Múltiples iteraciones. – Tiempo total del proceso dividido en Δt muy pequeños \rightarrow convergencia del resultado. – Gran inestabilidad.	

Tabla 4-1 Comparativa entre ANSYS, LS DYNA y ANSYS LS-DYNA

■ **Soluciones implícitas-explícitas, explícitas-implícitas y doble explícitas**⁵

El proceso de embutición de la chapa de este proyecto tiene una parte del análisis que se puede considerar explícita y otra implícita, en cada una de las cuatro etapas en las que se realiza:

- Explícita: bajada del punzón, contacto de la placa con los troqueles (punzón, pisas y matriz) y deformación de la chapa.
- Implícita: Cálculo de la recuperación elástica de la chapa (retirada súbita del punzón).

⁵ Ver referencias [1], [13], [14] para las soluciones implícitas-explícitas, explícitas-implícitas y doble-explícitas.

Resolver un proceso simple de conformado mediante una solución explícita-implícita es una buena opción, porque la parte dinámica se resuelve con el motor de resolución de LS-DYNA, mientras que el cálculo del “springback” sufrido por la placa tras retirar la carga se calcula con el motor implícito de ANSYS. No es tan sencillo, cuando se trata de resolver un proceso de deformación que sucede en varias etapas. La Tabla 4-2 muestra el resumen de los pasos de cálculo propuestos:

ETAPA DEL PROCESO	PROCESO REALIZADO	RESOLUCIÓN
Etapa 0: 1ª Embutición	Embutición con geometría conjunto_1	Explícita
	Springback asociado a la Etapa 0	Implícita
Etapa 1: 2ª Embutición	Embutición con geometría conjunto_2	Explícita
	Springback asociado a la Etapa 1	Implícita
Etapa 2: 3ª Embutición	Embutición con geometría conjunto_3	Explícita
	Springback asociado a la Etapa 2	Implícita
Etapa 3: 4ª Embutición	Embutición con geometría conjunto_4	Explícita
	Springback asociado a la Etapa 3	Implícita

Tabla 4-2 Posible resolución del proceso completo (simulación doble explícita-implícita)

Según el manual de ANSYS LS-DYNA se pueden transferir las bases de datos entre análisis explícitos e implícitos y viceversa. Para entender adecuadamente el procedimiento de resolución que se va a proponer, es necesario, explicar los dos tipos de solución y ver de qué forma se pueden emplear.


▪ Solución implícita-explícita

Las soluciones de un análisis implícito seguido de un análisis explícito pueden ser utilizadas en un amplio rango de problemas donde la tensión inicial de una estructura afecta a su respuesta dinámica. Por ejemplo: respuesta dinámica de una turbina que sufre deformaciones térmicas, efecto de las cargas de montaje y soporte de una turbina durante su funcionamiento, respuesta dinámica de una junta con pernos, etc.

Si se va a realizar un análisis estructural con solución implícita-explícita, se debe abrir ANSYS con la opción “Structural” para aplicar la precarga, cargas adicionales, o velocidades iniciales en la estructura que va a ser analizada. Una vez que el sistema se ha resuelto, los archivos de relajación se almacenan en el archivo “drelax” para poder iniciar el siguiente proceso dinámico explícito a partir de este estado tensional. La parte correspondiente al análisis transitorio comienza en el “tiempo 0” con una estructura estable precargada.

A continuación se describen brevemente los pasos a seguir:

1. Iniciar ANSYS utilizando “Jobname1”.
Recordar que hay que emplear materiales con comportamiento lineal.
2. Definir nodos adicionales y elementos que sean necesarios para completar la solución explícita (por ej., un ave en una simulación ave-impacto). Estos nodos adicionales no pueden formar parte del análisis implícito, pero es necesario definirlos en este paso. Se restringirán por lo tanto sus grados de libertad.

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 4</p> <p>Página: 40</p>
--	---	---------------------------------------

3. Resolver el análisis (solve).
4. Salvar el análisis implícito en la base de datos como fichero Jobname1.db
5. Cambiar el nombre del fichero a Jobname2.db para evitar que se sobrescriba la base de datos.
6. Volver al pre-procesador.
7. Convertir los elementos implícitos a sus correspondientes elementos explícitos. Se puede realizar manualmente o automáticamente por el programa.
8. Redefinir las opciones: constantes reales, condiciones de contorno, y valores de cargas en los nuevos elementos explícitos.
9. Borrar las restricciones de los nodos adicionales o de los elementos definidos en el paso anterior. Introducir y leer la solución del análisis anterior.
10. Leer los desplazamientos de los nodos, rotaciones, y temperaturas procedentes del archivo de resultados, y guardar esta información en un archivo ASCII LS-DYNA, drelax.
11. Iniciar el nuevo análisis con la estructura cargada con la información procedente del proceso anterior (información contenida en el archivo "drelax" y que previamente se ha cargado junto con el modelo). En este estado se inicializa el análisis explícito.
12. Aplicar las cargas necesarias para el análisis.
13. Resolver y finalizar el análisis dinámico explícito.


▪ **Solución explícita-implícita**

En el conformado de planchas metálicas, la deformación "springback" es un parámetro esencial que complica significativamente el diseño de la fabricación de herramientas. El "springback" o retorno elástico, es el cambio geométrico de una pieza tras el proceso de conformado, cuando dejan de actuar las fuerzas que las herramientas ejercen sobre ella. Se debe no sólo a la tensión y al límite de fluencia del material, si no también al espesor, al radio y ángulo de curvatura de la chapa. El análisis del "springback" se ha convertido en un reto para la simulación de conformado de chapa metálica. La introducción en la industria automovilística de los nuevos aceros de alto límite elástico y del aluminio ha provocado que los estampadores se preocupen cada vez más por este problema y su cálculo preciso. Ver también referencias [8] y [10]

La simulación del proceso de conformado es dinámica y explícita, mientras que el cálculo del "springback" se puede realizar de forma implícita, realizando la hipótesis de retirada súbita del punzón. Por lo tanto se puede realizar una resolución concatenada explícita-implícita del proceso, utilizando (al tratarse de chapas) como elementos deformables el SHELL 163 y/o SOLID 164. Entonces la deformada, las tensiones, y el espesor de los elementos se deben transferir a los correspondientes implícitos (SHELL 181 y SOLID 185). Una vez que se han comprobado las condiciones de contorno en el material, la simulación implícita del "springback" elástico se puede poner en marcha.

Pasos a seguir en la resolución explícita-implícita:

1. Iniciar ANSYS utilizando "Jobname1". Solucionar (solve) y finalizar el análisis.
2. Elementos SHELL 163 y/o SOLID 164 para el análisis del "springback".

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 4</p> <p>Página: 41</p>
--	---	---------------------------------------

3. Guardar el análisis explícito en la base de datos con un nombre de archivo Jobname.db
4. Cambiar el nombre de fichero a Jobname2 para evitar que se sobrescriba la base de datos.
5. Abrir el Pre-procesador.
6. Convertir los elementos explícitos del análisis en implícitos (ver correspondencia entre ellos en el manual de ANSYS LS-DYNA).
7. Redefinir las opciones: Constantes Reales, propiedades del material, condiciones de contorno, y valores de cargas de cualquier elemento explícito que vaya a ser convertido en elemento implícito.
8. Desactivar la opción “shape checking” puede que los elementos hayan sufrido deformaciones considerables durante el análisis explícito.
9. Actualizar la geometría al estado de deformación actual (update geometry).
10. Deseleccionar o borrar los elementos innecesarios (principalmente los modelizados como cuerpos rígidos en el análisis explícito), o convertirlos en nulos. En caso contrario, pueden provocar errores durante la resolución del proceso. Lo mismo ocurre con los cuerpos rígidos. Hay que importar el estado tensional anterior con el comando RIMPORT.
11. Introducir de nuevo la solución.
12. Introducir las restricciones necesarias en el modelo para modificar o añadir condiciones de contorno durante el análisis explícito.
13. Importar tensiones y cambio de espesor al cambiar de elementos explícitos a implícitos.
14. Verificar el sistema antes de lanzar la simulación.
15. Resolver y finalizar el análisis.

Como se puede ver en la Tabla 4-2, después de simular cada etapa, habría que cargar los resultados de la simulación implícita en la siguiente explícita (Etapa 0 → Etapa 1). Se trataría de una concatenación de simulaciones en la que habría que transferir bases de datos, que según el manual de ANSYS LS-DYNA se puede realizar sin problemas en un análisis como éste. Se podría calcular por lo tanto el “springback” de la chapa con métodos implícitos, porque supondría no sólo un menor tiempo de cálculo en cada etapa sino también el empleo de menos recursos computacionales.

La desventaja principal y la razón por la que se va a optar por otro tipo de concatenación de soluciones es que, como se ha comentado en la descripción del método de resolución implícito-explícito, se utiliza en problemas de relajación dinámica en los que previamente se ha aplicado una precarga (caso de análisis dinámico de una junta atornillada). Como este no es el caso, no va a ser posible emplearla.

La solución por la que se va a optar es por realizar una simulación doble explícita. Es decir, tanto la penetración como la retirada del punzón se van a realizar en la misma simulación (se elimina la hipótesis de retirada súbita del punzón), enlazando sólo simulaciones explícitas para realizar el cambio de geometría y la transferencia de resultados de la etapa anterior, ya que en cada etapa va a haber un conjunto distinto de punzón, pisa/s y matriz.

Solución doble explícita

La simulación doble explícita consta de una serie de pasos, que se resumirán a continuación y que se explicarán detalladamente en el apartado 4.2.3 Desarrollo de una herramienta de simulación mediante el programa de elementos finitos ANSYS LS-DYNA, en el que se detalla cada paso de la simulación realizado en cada etapa.

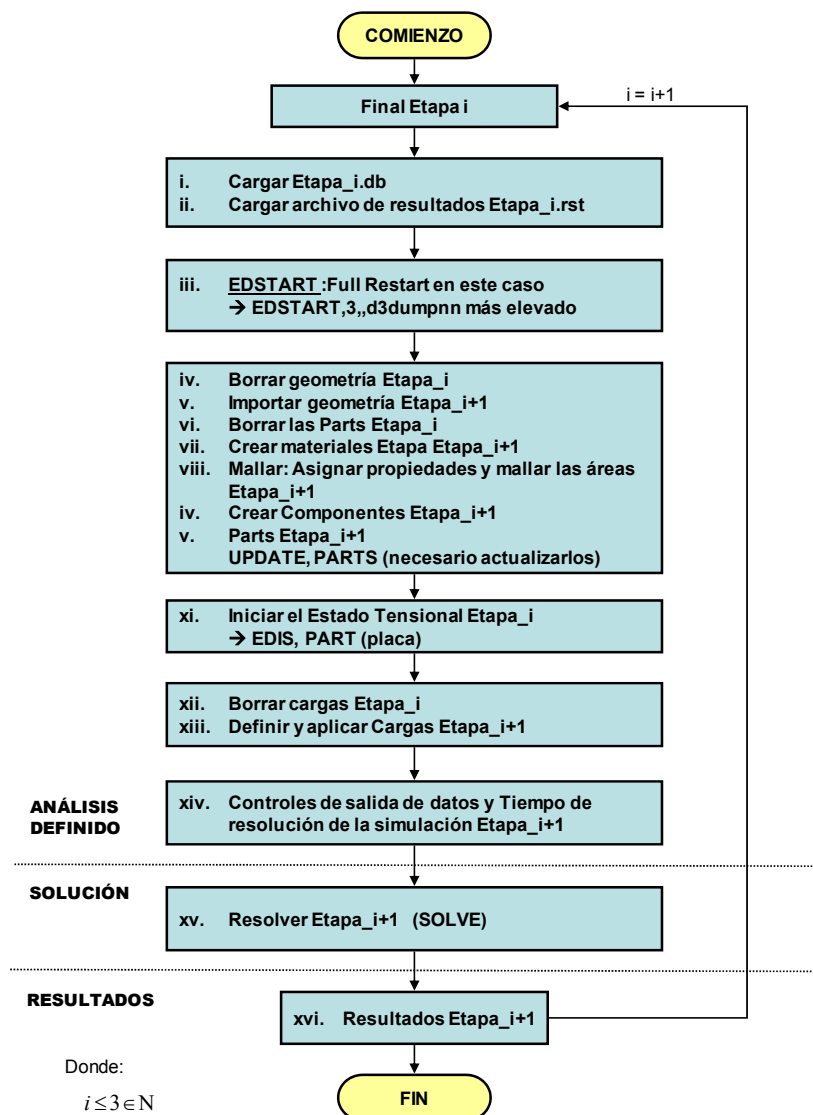



Figura 4-2 Simulación doble explícita: Pasos Realizados.

Cualquier método de resolución que se vaya a emplear tiene sus ventajas y sus inconvenientes. Hay que sopesar si las desventajas no perjudican lo suficiente como para desestimarlos. Las ventajas e inconvenientes de la simulación doble explícita son:

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 43
--	--------------------------------------	--------------------------------

Ventajas:

- Simplicidad en el proceso: Sólo va a haber una base de datos por la simulación de cada etapa. Lo que disminuye los posibles errores a la hora de importar/exportar estados tensionales, resultados, etc.
- Visualización completa del proceso: Se puede ver la penetración/retirada del punzón por completo, así como la progresión de la deformación de la chapa y su recuperación elástica.

▪ Desventajas:

- Incremento del tiempo de cálculo: La totalidad del cálculo va a ser explícito y ya no se supondrá la retirada del punzón como súbita, calculándose de la misma forma que la penetración, lo que aumentará considerablemente el tiempo de resolución como se ha comentado anteriormente.

El estudio puede llegar a complicarse si hay que contemplar demasiadas variables como: distintos tipos de elementos, modelos de material, distintas propiedades de los materiales, tamaño de mallado.... Se hace imprescindible para minimizar este inconveniente, un gran conocimiento tanto del proceso real como del programa de análisis.

- Aumento de los recursos empleados: Los recursos de CPU empleados se ven incrementados porque como ya se ha explicado, LS-DYNA divide el tiempo total del proceso en pequeños intervalos de tiempo, resolviendo el sistema completamente para cada uno de los intervalos hasta llegar al tiempo total de la simulación. Lo que significa que el programa resuelve numerosas iteraciones que van a necesitar todos los recursos de la CPU.


4.1.2. ANSYS y el módulo LS-DYNA

En este apartado se pretende explicar las opciones del programa que se van utilizar posteriormente en las simulaciones (tratando de mantener el mismo orden que en la programación de éstas). Como se ha comentado anteriormente, se va a utilizar tanto el pre-procesador como el post-procesador de ANSYS para poder introducir tanto la geometría con sus características como las condiciones de contorno, analizando posteriormente los resultados obtenidos. La asignación de "Parts", "Loads", "Contacts" se realizan con el módulo de LS-DYNA.

En primer lugar hay que elegir en el Menú Principal de ANSYS el tipo de Análisis que se quiere realizar junto con el método de resolución. De entre la gran cantidad de procesos que puede resolver este programa (ver Tabla 4-3) se va a elegir el análisis estructural explícito (dinámico no lineal) ya que se va a simular un proceso de Embutición y el método LS-DYNA Explicit [13].

ANSYS LS-DYNA trabaja principalmente con tres métodos de resolución: método-p, método-h y el Explícito de LS-DYNA, descritos a continuación:

- **Método-p:** El método-p obtiene resultados como desplazamientos, tensiones, o deformaciones con un grado de precisión determinado. Para calcular estos resultados, el método-p utiliza un polinomio de grado-p (ecuación constitutiva definida en función de las variables de estado del sistema) con el que se llega a una solución aproximada. Funciona definiendo una malla para un elemento, resolviéndolo para un grado-p determinado y aumentando el grado en cada

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 4</p> <p>Página: 44</p>
--	---	---------------------------------------

iteración. Los resultados se obtienen siguiendo un criterio de convergencia. Cuanto mayor es el grado del polinomio mayor es la aproximación a la solución real. Las principales ventajas de este método son: Utiliza una malla constante (normalmente más gruesa que la que se emplearía en el método-h), su flexibilidad (resuelve el sistema independientemente del mallado), su precisión en las soluciones y su velocidad.

- **Método-h:** Este método, a diferencia del anterior, no utiliza una malla constante si no una adaptativa, siendo necesario afinar el tamaño de la misma para conseguir una mayor precisión en los resultados. Esto hace que la velocidad de resolución del análisis sea menor, ya que cuantos más nodos se definen más se va tardar en resolverlo. Se puede emplear en análisis dinámicos, de fluidos, campos electromagnéticos, etc.
- **LS-DYNA Explicit⁶:** El método LS-DYNA Explicit como se ha visto en el apartado 4.1.1 se emplea para resolver procesos dinámicos explícitos no lineales. Es decir, con este método se pueden calcular desplazamientos, grandes deformaciones y tensiones con un grado de precisión en el resultado mayor cuanto más fino sea el mallado. Esto último incrementa el proceso de cálculo, ya que como se verá más adelante se itera en cada intervalo de tiempo, en que se subdivide el tiempo total del proceso. También se explicará con más detalle el criterio seguido a la hora de definir el paso de tiempo de la simulación, el proceso de los pasos seguidos para definir completamente la simulación y cómo evaluar los resultados.

Este último, es el método de cálculo escogido para la resolución de la embutición de la placa.

Para ver de una forma clara y resumida los distintos procesos que puede resolver ANSYS, con los distintos módulos con los que trabaja, se introduce la Tabla 4-3 en la que se describe: el tipo de análisis, su descripción (nombrando los puntos principales de cada uno) y una imagen representativa de cada uno de ellos.

⁶ Ver también referencia [14]



UNIVERSIDAD CARLOS III

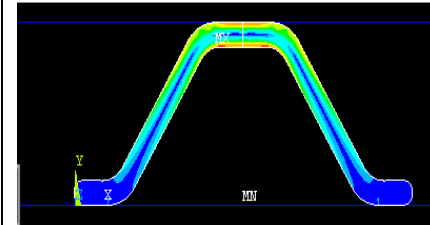
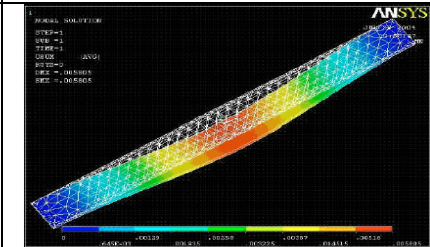
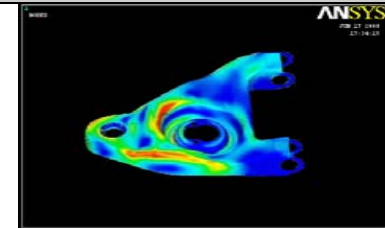
MADRID

Capítulo :

4

Página:

45

DISCIPLINA	TIPO DE ANÁLISIS	DESCRIPCIÓN	IMAGEN DEL ANÁLISIS
Estructural	Análisis Estáticos		
	Análisis Estático General	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo de desplazamientos, tensiones, etc. Bajo condiciones de cargas estáticas. - Análisis lineales y no lineales. - Anisotropía. - Las no linealidades pueden incluir: plasticidad, grandes deformaciones y desviaciones, contactos entre superficies, rigidización tensional... 	
	Análisis de Pandeo	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo de las cargas de pandeo y de la forma de la estructura deformada. - Análisis lineal y no lineal. 	
	Análisis Dinámicos		
	Análisis Modales	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo de frecuencias naturales y modos de vibración. - Simetría axial, cíclica y estructuras pretensionadas. 	



UNIVERSIDAD CARLOS III

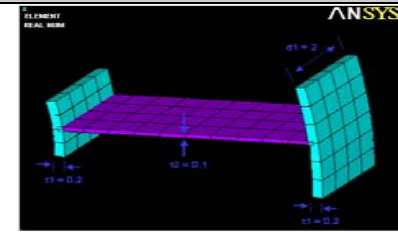
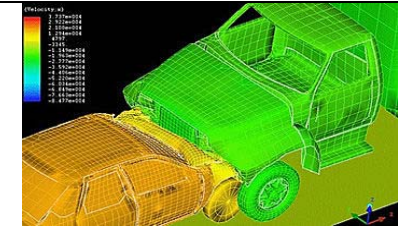
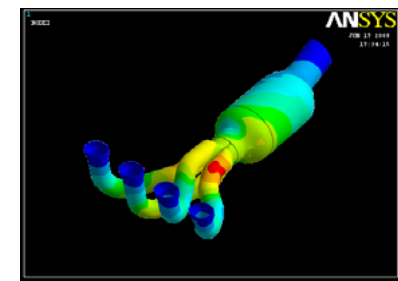
MADRID

Capítulo :

4

Página:

46

DISCIPLINA	TIPO DE ANÁLISIS	DESCRIPCIÓN	IMAGEN DEL ANÁLISIS
	Análisis Armónicos	<ul style="list-style-type: none"> - Determinación de la respuesta de una estructura ante la variación armónica de las cargas. - Bancadas, Cargas armónicas (viento, oleaje, etc.). 	
	Análisis Transitorios	<ul style="list-style-type: none"> - Determinación de la respuesta de una estructura ante la variación aleatoria de las cargas aplicadas. - Explosiones, Impactos, choques, Impulsos, Tráfico... 	
	Análisis de Espectro	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo de tensiones y deformaciones debido a un espectro de respuesta o a una entrada PSD (vibraciones aleatorias). - Análisis sísmico: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Espectral (Sencillo y múltiple). ▪ PSD (vibraciones aleatorias). ▪ Acelerogramas (transitorios lineales y no lineales). 	



UNIVERSIDAD CARLOS III

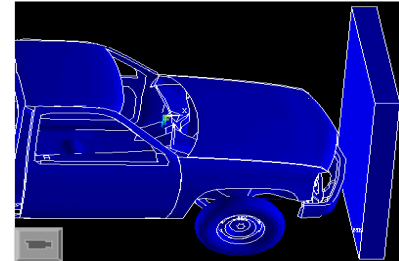
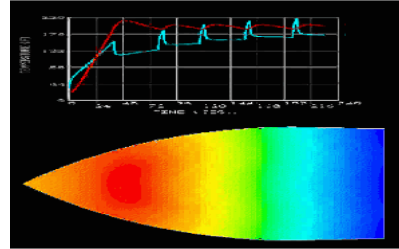
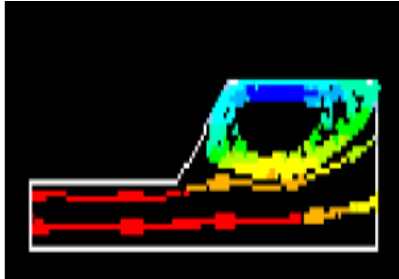
MADRID


Capítulo :

4

Página:

47

DISCIPLINA	TIPO DE ANÁLISIS	DESCRIPCIÓN	IMAGEN DEL ANÁLISIS
	Análisis Explícito	<ul style="list-style-type: none"> - Disponible en ANSYS LS-DYNA. - Cálculo de soluciones relativamente rápidas a problemas dinámicos con grandes deformaciones y contactos entre elementos complejos. - Utilizado en ensayos de impacto, choques, conformado a alta velocidad... 	
Térmico	Análisis Estado Estacionario	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo de la distribución de temperaturas y otras variaciones térmicas en un sistema: distribución de temperatura, transferencia de calor, gradientes y flujos térmicos. 	
	Análisis Estado Transitorio	<ul style="list-style-type: none"> - Estudio de intercambiadores de calor, turbinas, componentes electrónicos, motores de combustión. 	
Fluidos (CFD)	Análisis Estado Estacionario y/o Transitorio	<ul style="list-style-type: none"> - ANSYS puede simular: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Flujos laminares y turbulentos. ▪ Transferencias térmicas: <ul style="list-style-type: none"> ▫ Conducción. ▫ Convección natural. ▫ Convección forzada. ▪ Transferencia de calor conjugada. 	

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 48
--	--------------------------------------	--------------------------------

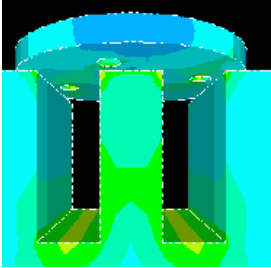

DISCIPLINA	TIPO DE ANÁLISIS	DESCRIPCIÓN	IMAGEN DEL ANÁLISIS
	Análisis de Fluidos	- Estudios de: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fluidos compresibles o incompresibles. ▪ Newtonianos y no Newtonianos. 	
Electromagnético	Cálculo de campos magnéticos en aparatos electromagnéticos.		
	Análisis Estático	- Cálculo de campos magnéticos debidos al paso de corriente continua (DC) o imanes permanentes.	
	Análisis Armónico	- Cálculo de campos magnéticos debidos al paso de corriente alterna.	
	Análisis Transitorios	- Se utiliza para simular variaciones en campos magnéticos.	

Tabla 4-3 Tipos de Análisis realizado con LS-DYNA⁷ [ANSYS LS-DYNA User's guide]

⁷ Ver referencias [16], [17], [19], [20] tanto para la información de la tabla como para las imágenes utilizadas.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 49
--	--------------------------------------	--------------------------------

Tal y como se ha comentado al comienzo del apartado, se van a describir las opciones del programa que se van a emplear siguiendo el orden establecido en la Figura 4-1 (Simulación Simple Explícita: Pasos realizados), sólo que incluyendo en el apartado 4.1.2.2 Solución, la descripción del “Full Restart” empleado en una simulación doble explícita. De esta forma se pueden explicar todas estas opciones juntas pero siguiendo un orden.

4.1.2.1. Preprocesador ⁸

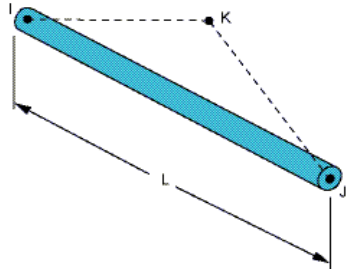
i) Generación/Importación de la geometría

Dependiendo de la complejidad del proceso que se quiera simular, se podrá generar o no la geometría con ANSYS. Aunque las herramientas de este programa son limitadas en cuanto al diseño (se pueden dibujar elementos de geometría poco compleja), sí permite la importación directa de una gran variedad de formatos gráficos procedentes de programas de diseño como: CATIA, PRO/ENGINEER, PARASOLID..... a través del “Utility Menu” o del comando IOPTN.

Del mismo modo se puede importar la geometría, independientemente del programa con el que se haya dibujado, con el formato estándar IGES (extensión .igs). Esta última opción es interesante si el objetivo es analizar un proceso partiendo de una geometría dada, como es el caso de este proyecto.

ii) Tipos de Elementos (LS-DYNA Explicit Elements)

La librería de ANSYS (Main Menu > Preprocessor > Material Properties) permite escoger de entre una gran variedad de elementos con distintas características con los que se pueden modelizar procesos con comportamientos muy distintos tipo: placa, “brick”, muelle, amortiguador...Luego hay que escoger el que se más se adecua al acero que queremos estudiar, para obtener resultados, precisos, fiables y comparables con la realidad. La siguiente tabla muestra una breve descripción de los “LS DYNA Explicit Elements”, ya que como se ha comentado anteriormente se van a realizar simulaciones doblemente explícitas para estudiar la embutición de la chapa.

TIPO DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
LINK 160	<ul style="list-style-type: none"> - Cada elemento está formado por 3 nodos con 3 g.d.l. cada uno. - Soporta cargas axiales. - Sólo se emplea en análisis dinámicos explícitos (no lineales). 	

⁸ Ver referencias [12] y [13] para la información de esta sección.



TIPO DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
BEAM 161	<ul style="list-style-type: none"> - Modelizado de vigas. - Eficiencia computacional y robustez de cálculo. - Compatible con elementos sólidos tipo "brick". - Admite esfuerzos cortantes. - Sólo se emplea en análisis dinámicos explícitos (no lineales). 	
PLANE 162	<ul style="list-style-type: none"> - Modelos en 2D. No se puede mezclar con elementos 3D en el mismo modelo. - Cada elemento está formado por 3 ó 4 nodos con 6 g.d.l. cada uno. - Sólo se emplea en análisis dinámicos explícitos (no lineales). 	<p>(Triangular Option - not recommended)</p>
SHELL 163	<ul style="list-style-type: none"> - Como elemento Shell es adecuado para modelizar elementos de chapa. - Elementos formados por 4 nodos con 12 g.d.l. cada uno ($\vec{v}, \vec{a}, \vec{s}, \vec{w}$ en X,Y,Z) - Admite esfuerzos de flexión y presenta comportamiento de membrana; permite aplicar cargas sobre el plano y normales al mismo. - Sólo se emplea en análisis dinámicos explícitos (no lineales). 	<p>Note: x and y are in the plane of the element</p> <p>Triangular Option - not recommended</p>
SOLID 164	<ul style="list-style-type: none"> - Sólidos en 3D. - Cada elemento está formado por 8 nodos con 9 g.d.l. cada uno ($\vec{v}, \vec{a}, \vec{s}$) en las direcciones X,Y,Z) - Sólo se emplea en análisis dinámicos explícitos (no lineales). 	<p>Wedge Option</p> <p>Tetrahedral Option</p> <p>Pyramid Option</p>




TIPO DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
COMBI 165	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas elásticos y de absorción de energía (resortes y amortiguadores). - Elementos de 2 nodos. - Permite superponer dos elementos COMBI 165 distintos que comparten nodos. - Sólo se emplea en análisis dinámicos explícitos (no lineales). 	
MASS 166	<ul style="list-style-type: none"> - Elemento de un solo nodo con 9 g.d.l. ($\vec{v}, \vec{a}, \vec{s}$ en las direcciones X,Y,Z). - Permite definir el momento de inercia del elemento, en lugar de su masa. 	
LINK 167	<ul style="list-style-type: none"> - Permite modelizar cables elásticos con un comportamiento muy cercano a la realidad. - No admite esfuerzos a compresión. - Sólo se emplea en análisis dinámicos explícitos (no lineales). 	
SOLID 168	<ul style="list-style-type: none"> - Elemento sólido tetraédrico parabólico de diez nodos. - Apropiado para mallados irregulares y para figuras importadas de otros sistemas CAD/CAM. - Consta de 3 nodos con tres g.d.l. cada uno (\vec{s} en X, Y, Z). 	

Tabla 4-4 Tipos de elementos “LS DYNA Explicit”

De los elementos presentados en la Tabla 4-4, se va a escoger el elemento Shell 163 para modelizar todos los objetos involucrados en el proceso (troqueles: punzones, matrices, pisas y la placa que va a ser embutida).

Se tiene que escoger un elemento tipo Shell porque la geometría empleada en la simulación va a estar formada por áreas planas (sin espesor), que facilitan el cálculo de las simulaciones reduciendo el tiempo computacional (se tienen componentes con menos nodos).

Una vez, escogido el elemento que se va a emplear en el análisis, se va a realizar un breve descripción de los elementos Shell, en concreto el Shell 163, y sus propiedades.

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 4</p> <p>Página: 52</p>
--	---	---------------------------------------

Elementos Shell

Los elementos Shell [ANSYS References] están diseñados para modelizar estructuras delgadas, que tienen la ventaja de admitir esfuerzos cortantes en su superficie libre. La tensión se transmite a través de ellos de forma lineal excepto en los bordes debido a que no presentan las mismas propiedades.

No hay normas estrictas en cuanto su empleo, pero si el componente estructural se comporta como una chapa, entonces se debe utilizar los elementos tipo Shell, teniendo en cuenta que este programa no comprueba si el espesor del elemento supera la anchura del mismo.

En todos los elementos Shell el eje Z es perpendicular al plano de trabajo. El eje x pertenece al plano, con una orientación determinada por: el comando ESYS, la cara del elemento perteneciente al plano i-j o por las constantes Reales.

Elemento Shell 163 (Explicit Thin Structural Shell)

Como se ha especificado en la Tabla 4-4 el elemento Shell 163 es un elemento de 4 nodos (12 GDL cada uno $\vec{v}, \vec{a}, \vec{s}, \vec{w}$ en X, Y, Z) que admite esfuerzos de flexión y tensiones de membrana (cargas constantes de tracción o compresión provocadas por cargas actuando en el plano de los elementos Shell). Permite aplicar cargas en plano y normales al mismo. Sólo se emplea en análisis dinámicos explícitos (no lineales).

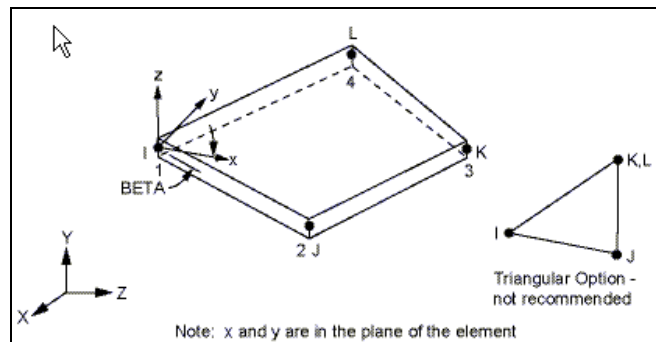


Figura 4-3 Elemento Shell 163

Nota: En análisis dinámicos explícitos, $V(X, Y, Z)$ y $A(X, Y, Z)$ son la velocidad y aceleración de los nodos respectivamente. Aunque éstos aparezcan como grados de libertad, a la hora de definir el elemento, no lo son físicamente. Sin embargo, el programa los considerará como tales a la hora de resolver el problema y serán tratados como tales en el postprocesado.

- Datos de entrada:

- Constantes Reales: SHRF, NIP, T1, T2, T3, T4 (descritas en la Tabla 4-5).

Las Constantes Reales son parámetros necesarios para definir completamente el elemento escogido. En el caso del elemento Shell son: El esfuerzo cortante (el programa establece un valor por defecto), los Números de Puntos de Integración y el espesor.

Hay que tener en cuenta que, si el espesor de la chapa es constante sólo es necesario introducir el dato en uno de los nodos, si no lo es habrá que añadir los distintos espesores en cada uno de los nodos que forman el elemento Shell.

Número	Nombre	Descripción
1	SHRF	- Esfuerzo Cortante. - Valor sugerido: 5/6, si se deja en blanco, por defecto 1.
2	NIP	- Número de Puntos de Integración. - Si se introduce un valor 0 ó se deja en blanco, por defecto 2.
3	T1	- Espesor del Elemento Shell en el nodo I.
4	T2	- Espesor del Elemento Shell en el nodo J.
5	T3	- Espesor del Elemento Shell en el nodo K.
6	T4	- Espesor del Elemento Shell en el nodo L.


Tabla 4-5 Constantes Reales

-Tipo de Material:

Para este elemento, se puede elegir entre los siguientes materiales: Isotropic Elastic, Orthotropic Elastic, Bilinear Kinematic, Plastic Kinematic, Blatz-Ko Rubber, Bilinear Isotropic, Temperature Dependent Bilinear Isotropic, Power Law Plasticity, Strain Rate Dependent Plasticity, Composite Damage, Piecewise Linear Plasticity, Modified Piecewise Linear Plasticity, Money-Rivlin Rubber, 3-Parameter Barlat Plasticity, Transversely Anisotropic Elastic Plastic, Rate Sensitive Power Law Plasticity, Transversely Anisotropic FLD, Elastic Viscoplastic Thermal, Johnson-Cook Plasticity, Bammann, Rigid Model (Cuerpo Rígido).

-Posibles formulaciones:

1. Hughes-Liu: Está basada en una formulación de integración reducida. El coste computacional es muy elevado pero bastante efectivo cuando se trata de deformaciones muy grandes. Resuelve con precisión casos de placas alabeadas.
2. Belytschko-Tsay: Esta formulación (seleccionada por defecto) es la más rápida a la hora de resolver análisis dinámicos con placas. Se basa en el supuesto de Mindlin-Reissner, de forma que se van a tener en cuenta las tensiones cortantes producidas en la placa. Emplea la formulación de integración reducida con "Hourglass Control". Con objeto de controlar este fenómeno, el programa da un valor por defecto al parámetro de Hourglass.
3. BCIZ Triangular Shell element: Formulación basada en la Teoría de Kirchhoff para placas delgadas. Se emplean tres puntos de integración reducida para cada uno de los elementos, así que es relativamente lenta.
4. CO Triangular Shell element: Basada en la Teoría Mindlin-Reissner para placas. Emplea la integración reducida de un solo punto. Es bastante rígida, así que no se suele utilizar para construir una malla completa, si no una transición entre mallas.
5. Belytschko-Tsay membrane element: La formulación Belytschko-Tsay para elementos con comportamiento de membrana (KEYOPT1 = 5) es igual que la Belytschko-Tsay, pero sin rigidez frente a la flexión.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 54
--	--------------------------------------	--------------------------------

6. S/R Hughes-Liu: Emplea la integración reducida selectiva. Esto incrementa el coste computacional, pero evita algunos modos de “Hourglass”.
7. Belytschko-Leviathan: Emplea la integración reducida de un punto pero utilizando un control físico de los modos de Hourglass, así que no es necesario introducir ningún parámetro de control.
8. Belytschko-Tsay fully-integrated: Igual que la Belytschko-Tsay excepto que utiliza una integración integrada de un punto de 2x2. Es más robusta para placas alabeadas.
9. Belytschko-Wong-Chiang: Equivale a la Belytschko-Tsay excepto porque se evitan los defectos de las superficies alabeadas. Tiene un coste de más de un 10%.
10. Co-rotacional Hughes-Liu: Igual que la Hughes-Liu excepto porque ésta emplea un sistema Co-rotacional.
11. Belytscho-Tsay fully-integrated: Emplea una integración 2x2 reducida de un solo punto en el plano de la chapa y es 2.5 veces más lenta que la Belytscho-Tsay. Es útil para superar el efecto Hourglass.

De las 12 posibles formulaciones, se va a emplear la que por defecto elige el programa, porque es la más rápida a la hora de resolver análisis dinámicos con placas y la velocidad de resolución como se verá a lo largo de la definición de todas las simulaciones, será un parámetro a tener muy en cuenta. Además, el programa da un valor por defecto al parámetro de control de “Hourglass” (deformación irreal de la malla debido al empleo de la integración reducida).

-Cargas aplicadas en la superficie del elemento Shell :

- Presión (aplicada en la superficie media).
- Cargas aplicadas en cuerpos.
- Temperaturas (ANSYS LS-DYNA User’s Guide)

Este elemento trabaja con funciones no lineales, permitidas por un análisis dinámico explícito.

-Reglas de Integración Reducida :

- Ley de Gauss (permitidos más de 5 puntos de integración).
- Regla del Trapezoide (permitidos más de 100 puntos de integración).

-Modo de funcionamiento :


Dentro de la opción “Tipo de Elemento” se puede seleccionar el modo de material compuesto. Si se elige:

- KEYOPT 3 = 0, se desestima el modo de material compuesto.
- KEYOPT 3 = 1, se elige el modo de material compuesto; hay que definir en este caso un ángulo material para cada NIP a través del espesor del elemento.

-Regla de Integración :

Regla de Integración:

- KEYOPT 4 = 0 (por defecto) → Rango válido [1;9999]

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 55
--	--------------------------------------	--------------------------------

- KEYOPT 4 = n → Si se selecciona, sobrescribe la regla de integración definida en KEYOPT 2.

- **Datos de Salida :**

Tensiones, Tensiones Principales, Deformaciones principales, intensidad de deformación elástica...

- **Suposiciones y Restricciones:**

- No se permiten crear elementos con área cero. Esto ocurre más a menudo cuando no se han numerado los elementos correctamente.
- No se permiten elementos con espesor cero o aquellos cuyo espesor disminuya a cero en las esquinas.
- Los triangulares se pueden formar duplicando los nodos K y L tal y como se describe en el capítulo del manual de ANSYS “elementos Triangulares, Prismáticos y tetraédricos”.
- Un conjunto de elementos planos Shell puede servir como una buena aproximación de una superficie curvada Shell con tal de que cada elemento plano no tenga arcos de más de 15°.
- No está permitido utilizar elementos Shell compuestos. Por defecto 0.

iii) Definir las Constantes Reales

Como se ha visto en la descripción del elemento Thin Shell 163, las constantes reales que hay que introducir dependen precisamente del tipo de elemento escogido para el proceso. En este caso sólo es necesario definir el espesor del elemento:

- R2 = 2mm, la placa de acero que se va a embutir tiene un espesor real de dos milímetros.
- R1 = 0.001mm, para los troqueles (punzones, pisas y matrices de todas las etapas). La representación geométrica de los troqueles es la de una serie de elementos formados por áreas sin espesor, que se suponen infinitamente rígidos, de forma que el valor de espesor que se les asigna debe ser el menor posible para facilitar el cálculo y reducir el tiempo computacional.


Como los espesores de la chapa y de los troqueles se van a suponer constantes sólo hay que introducir el espesor del primer nodo. Tanto el esfuerzo cortante (SHRF) como los Números de puntos de Integración (NIP) se dejan en blanco porque se acepta el valor por defecto.

iv) Propiedades del Material (Modelos constitutivos)

A continuación hay que definir dos modelos constitutivos de material: uno para la chapa y otro para los troqueles (punzones, matrices y pisas). El primer material debe reflejar la deformación de la chapa tras cada embutición, el segundo va a representar un grupo de cuerpos rígidos sobre los que se va a suponer que no se produce deformación alguna (ver también referencia [1]).

■ **Modelo Constitutivo de la placa**

Se debe escoger un modelo constitutivo de material que refleje lo más fielmente posible el comportamiento real de la chapa en cada una de las etapas de la embutición. De entre el centenar de modelos que se pueden encontrar en la librería de ANSYS, hay que escoger uno que cumpla los siguientes requerimientos:


	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 56
--	--------------------------------------	--------------------------------

- Trabajar con metales.
- Tener en cuenta el efecto de la velocidad en la deformación.
- Permitir el estudio ante el fallo del material.
- Poder trabajar con el elemento Thin Shell 163 (tipo de elemento escogido para modelizar la placa).

Posibles modelos constitutivos que podrían emplearse en el análisis:

De entre la gran cantidad de modelos de material que se pueden encontrar en la librería de ANSYS [12], hay principalmente cuatro modelos que se ajustan al comportamiento del material de la chapa durante la deformación. Son los siguientes:

1. **Modelo de plasticidad de Johnson/Cook:** Modelo (también llamado viscoplástico) de plasticidad dependiente de la temperatura, con comportamiento adiabático debido a que no se considera la transferencia de calor a través del elemento, sólo se tienen en cuenta la variación de la temperatura del mismo debido a la deformación plástica. Puede trabajar con elementos tipo Shell y sólidos. El modelo Johnson/Cook se puede emplear con materiales sometidos a elevadas velocidades de deformación. Parámetros que definen el modelo: densidad, módulo de Young, Coeficiente de Poisson, temperatura de fusión, temperatura ambiente, calor específico, distintos parámetros que determinan las ecuaciones constitutivas (ver manual de ANSYS LS-DYNA), tensión de rotura.
2. **Modelo Plastic Kinematic:** El modelo Plastic Kinematic, puede presentar un comportamiento isotrópico, cinemático o una combinación de ambos con endurecimiento cinemático. Trabaja bien con elementos que sufren grandes deformaciones, no siendo un modelo complicado de comportamiento. Puede trabajar con una gran cantidad de tipos de elementos y entre ellos, elementos Shell. Se define con los siguientes parámetros: densidad, módulo de Young, coeficiente de Poisson, límite elástico aparente, módulo tangente, parámetro de endurecimiento, coeficientes de Cowper-Symonds (emplea el modelo de Cowper Symonds) y tensión de rotura.
3. **Modelo Bilinear Kinematic:** Modelo de plasticidad isotrópico dependiente de la velocidad de deformación, utilizado principalmente para análisis de conformado de metales y plásticos. Se utiliza una curva de carga para describir la tensión de fluencia inicial, σ_0 en función del límite de fluencia y de la velocidad de deformación. También puede definirse el módulo de Young y el módulo tangente en función de esta velocidad de deformación. Sería posible incorporar criterios de fallo del material definiendo:
 - La tensión de Von Mises en el momento del fallo en función de la velocidad de deformación.
 - Empleo de materiales tipo chapa: criterio de fallo asociado a la disminución del paso temporal cuando el mallado se distorsiona demasiado.
Parámetros que definen el modelo: densidad, módulo de Young, Coeficiente de Poisson, curva de entrada de la tensión inicial, módulo tangente, curvas de carga (ver manual de ANSYS LS-DYNA).
4. **Modelo lineal Piecewise:** Modelo elastoplástico que incluye el efecto de la velocidad de deformación, permitiendo introducir en sus propiedades: una ecuación que relaciona la tensión de fluencia con la deformación (modelo de Cowper-Symonds), una curva tensión-deformación o una tabla que relacione la deformación con la tensión de fluencia para distintos niveles de deformación. Sigue una ley de plasticidad muy común, especialmente

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 57
--	--------------------------------------	--------------------------------

para el acero. El fallo basado en la deformación plástica puede ser representado con este material.

Por su simplicidad y buen comportamiento en grandes deformaciones de elementos tipos Shell con endurecimiento cinemático, se escoge el modelo Plastic Kinematic, que se explicará en detalle a continuación.

Modelo Plastic Kinematic (modelo plástico Cinemático)

El modelo de material “Plastic Kinematic” puede tener un comportamiento Isotrópico, cinemático, o una combinación de modelos con endurecimiento isotrópico y cinemático dependiente de la velocidad de deformación y fallo. Las contribuciones isotrópicas y cinemáticas pueden variar ajustando el parámetro de endurecimiento β , que puede variar entre 0 (sólo endurecimiento cinemático) y 1 (1 sólo endurecimiento Isotrópico). La velocidad de deformación se calcula utilizando el modelo de Cowper-Symonds que determina el límite elástico a partir del factor de deformación tal y como se muestra a continuación:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \cdot (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff})$$

Donde σ_0 es el valor inicial del límite elástico, $\dot{\epsilon}$ es la velocidad de deformación, C y P son los parámetros de Cowper-Symonds, ϵ_p^{eff} deformación plástica efectiva, y E_p es el módulo de endurecimiento cinemático que viene dado por la siguiente expresión:

$$E_p = \frac{E_{tan} E}{E - E_{tan}}$$

En el caso de endurecimiento Isotrópico, el centro de la superficie de fluencia permanece fijo pero su dimensión aumenta (se incrementa el radio) durante el transcurso de la deformación plástica.

En el caso de endurecimiento cinemático se asume que la superficie de fluencia permanece constante y se desplaza a lo largo de las direcciones principales mientras que la deformación plástica avanza.


Definición en ANSYS LS-DYNA

El material Plastic Kinematic se puede definir como tipo de material utilizando el comando EDMP o a través del Menú principal (Main Menu) de ANSYS.

Parámetros:

Hay que introducir los siguientes parámetros para determinar completamente las características del material:

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
DENS	Densidad [kg/m ³]
E _x	Módulo de elasticidad (módulo de Young) [MPa]
NUXY	Coeficiente de Poisson
Yield Stress (σ_y):	Límite elástico aparente (Límite de Fluencia). [MPa]
Tangent Modulus (E_{tan}):	Módulo tangente [MPa]

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 58
--	--------------------------------------	--------------------------------

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Hardening Parameter (β)	Parámetro de endurecimiento [0;1]
Coeficientes de Cowper-Simons: - Strain Rate (C). - Strain rate (P).	Coeficientes de Cowper-Symonds: - Velocidad de deformación.(C) - Velocidad de deformación.(P)
Failure strain (ϵ_f)	Tensión de rotura

Tabla 4-6 Parámetros del material Plastic Kinematic

Particularizando en el proceso de embutición que se va a simular, se van a introducir todos los parámetros de la Tabla 4-6 como datos conocidos. Incluyendo: la densidad, el módulo de elasticidad E_x , el coeficiente de Poisson, del acero empleado en la fabricación de la pieza y el Parámetro de endurecimiento (β) que en este caso va a ser cero. Por lo tanto, el comportamiento de este material va a ser “Plástico con Endurecimiento Cinemático”.

▪ **Modelo constitutivo de las herramientas**

Rigid Body (Cuerpo Rígido)

Un cuerpo rígido es una idealización de un cuerpo sólido con un tamaño determinado en el que no se permite deformación alguna. En otras palabras, la distancia entre dos puntos dados de un cuerpo rígido permanece constante en el tiempo independientemente de las fuerzas externas aplicadas en él. [12]

Como se ha comentado, para modelizar los troqueles de las cuatro etapas de la embutición se van a utilizar “Cuerpos Rígidos”. Esto se debe a que el material con el que se construye este tipo de elementos tiene una dureza muy elevada y mucho mayor que el material que va a deformar (placa). Razón por la que se va a partir de la hipótesis de rigidez infinita (su desgaste aunque muy pequeño no se va a tener en cuenta en este proceso), simplificando el análisis global. No obstante, hay que tener en cuenta a la hora de emplear estos materiales, que se está cometiendo un error (aceptable) debido a que en la realidad estos materiales se desgastan y se deforman.

Justificación del empleo de este tipo de material:

- Se puede emplear en análisis cinemáticos.
- Simplificación del análisis. Sólo se contempla la deformación de uno de los objetos del proceso, interviniendo seis en cada una de las etapas.
- Soluciones más rápidas, debido a que estos elementos se pueden mallar con un tamaño (restringido por la geometría) relativamente grande, lo que se traduce en Componentes y “Partes” (se explicará más adelante) con menos nodos y por lo tanto un menor tiempo computacional de la simulación de cada etapa de la embutición.
- Son muy robustos. Sin problemas de convergencia.

Definición en ANSYS LS-DYNA:

Los “Rigid Bodies” (cuerpos rígidos) se definen como tipo de material utilizando el comando EDMP o a través del Menú principal (Main Menu) de ANSYS.

Todos los cuerpos definidos con este material específico serán considerados como parte de ese cuerpo rígido. Este material (lleva asignado un número que lo diferencia de los demás), junto con el “Tipo de Elemento” y “las Constantes Reales” de estos elementos, se definirá el “PART ID” (número de Parte) del Cuerpo Rígido. Posteriormente tanto las cargas como las restricciones del sistema, se aplicarán directamente sobre estas “PARTS” ID. Por lo tanto para representar, dentro de un modelo, distintos elementos con características de Cuerpo Rígido, hay que definir un material para cada uno de los elementos. En ningún caso, se podrá utilizar el mismo material para elementos distintos aunque compartan las mismas propiedades.

Parámetros:

Hay que introducir los siguientes parámetros para determinar completamente las características del material:

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
DENS	Densidad [kg/m ³]
E _x	Módulo de Elasticidad (Módulo de Young) [MPa]
NUXY	Coefficiente de Poisson

Tabla 4-7 Parámetros del material Rigid

Nota: Para introducir los parámetros tanto del “Plastic Kinematic” como del “Rigid Material”, se puede utilizar o bien el comando MP o a través del árbol del “Main Menu” de ANSYS.


Restricciones:

Para aplicar correctamente las restricciones sobre un cuerpo rígido, es decir, los parámetros de los campos de desplazamiento (VAL1) y rotación (VAL2), se puede utilizar el comando EDMP, o el Menú desplegable dentro de la opción “Material Models > Rigid Material” introduciendo los siguientes datos:

VAL1: Parámetro de restricción de desplazamientos (relativo al sistema global de coordenadas cartesianas).

0	Sin restricciones (por defecto)
1	Desplazamiento según la dirección X restringido
2	Desplazamiento según la dirección Y restringido
3	Desplazamiento según la dirección Z restringido
4	Restringidos los desplazamientos en X e Y
5	Restringidos los desplazamientos en Y y Z
6	Restringidos los desplazamientos en X y Z
7	Restringidos todos los desplazamientos (X, Y, Z)

Tabla 4-8 Parámetros de restricción de desplazamientos.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 60
--	--------------------------------------	--------------------------------

VAL2: Parámetro de restricción de giro (relativo al sistema de Coordenadas Global Cartesiano).

0	Sin restricciones (por defecto)
1	Giro según la dirección X restringido
2	Giro según la dirección Y restringido
3	Giro según la dirección Z restringido
4	Restringidos los Giros en X e Y
5	Restringidos los Giros en Y y Z
6	Restringidos los Giros en X y Z
7	Restringidos todos los giros (X, Y, Z)

Tabla 4-9 Parámetros de restricción de giros

v) Restricciones

Las restricciones sobre cada uno de los objetos pueden introducirse de tres formas:

- Durante la definición del propio material que posteriormente será asignado a cada elemento. Siempre va a haber un material distinto para cada uno.
- En el módulo LS-DYNA del pre-procesador de ANSYS. En la opción: “Constraints”.
- En el módulo de “Solution” de ANSYS. En la opción: “Constraints”.

En este caso se van a restringir los GDL respecto al desplazamiento en las direcciones X e Y (la dirección de moviendo es la Z) de uno o varios troqueles de cada etapa de la embutición y los tres GDL respecto al giro de todos ellos.


A la placa, en cambio, no se le impone ningún tipo de restricción porque va a ser el objeto sobre el cual se van a producir las deformaciones y debe tener libertad de movimiento en cualquier dirección. En cuanto a las restricciones al giro, no es necesario definirlas porque la los movimientos de la placa quedan limitados por el punzón, los pisas y la matriz de cada paso.

No obstante, en el apartado 4.2.3 Desarrollo de una herramienta de simulación mediante el programa de elementos finitos ANSYS LS-DYNA, se explica cada una de las etapas de la embutición y será en el apartado de la definición de los materiales dónde se especifique qué restricciones se impone a cada uno de los componentes del conjunto.

vi) Mallado: asignación de las propiedades y mallado de las áreas

Una vez que se ha definido el Tipo de Elemento, las Constantes Reales y los Materiales de los objetos que intervienen en el proceso (punzones, matrices, pisas y chapa) hay que proceder al mallado de los mismos, asignando previamente a cada uno las propiedades anteriormente citadas (“Mesh Attributes”).

Cuando se procede a realizar el mallado hay que tener en cuenta que el programa va a calcular el proceso completo a través de pequeños intervalos de tiempo (time step size). Estos pasos de tiempo Δt van a determinar la precisión de la solución final. Por defecto el programa va a escoger un Δt en función de la longitud mínima del elemento de malla de cualquiera de los objetos que intervienen en el análisis, $l_{min.}$ y la velocidad del sonido c .

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 61
--	--------------------------------------	--------------------------------

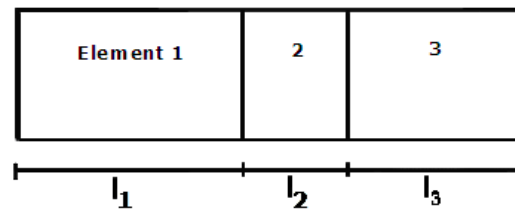


Figura 4-4 Cálculo del incremento de tiempo de la simulación

También, para un mallado dado, el mínimo paso de tiempo depende de la velocidad del sonido, la cual es función de las propiedades del material (densidad, módulo elástico y coeficiente de Poisson). Se puede utilizar también el comando EDTP para comprobar el paso de tiempo Δt en el análisis que se esté considerando.

El programa determina el “time step size” a partir de las siguientes expresiones y según los datos introducidos:

$$\Delta t_{\min} = \frac{l_{\min}}{c} = \frac{l_2}{c} \qquad c = \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2) \cdot \rho}}$$

Donde:

ν = Coef. de Poisson

ρ = densidad

E = Módulo de Young.


Por lo tanto, el tamaño del mallado va a influir directamente en el tiempo de resolución del proceso y en la precisión de los resultados obtenidos. Hay que llegar a un nivel de compromiso entre unos resultados lo más precisos posibles y un tiempo de resolución razonable.

Con el comando EDCTS, se puede modificar el “time step size” calculado, pero LS-DYNA no lo utiliza por defecto y en realidad el manual ANSYS LS-DYNA User’s guide [12] no especifica de qué manera afecta su modificación en la resolución o en los posibles resultados obtenidos. Por estos motivos, lo mejor es dejar el Δt determinado por el programa.

Como elementos rígidos los punzones, matrices y pisas pueden ser mallados con un tamaño bastante grande de forma que se simplifique y se agilice el cálculo, lo que ocurre en este caso es que la geometría de los troqueles es muy compleja (punzones y matrices de las etapas dos y tres) y exige que el mallado sea muy pequeño porque de lo contrario se distorsionaría la misma (ver apartado 4.2.2 Comprobación del estado de la geometría en ANSYS)

Por otro lado, la placa que se va a deformar está dividida en una serie de zonas que van a ser malladas con un tamaño lo más pequeño posible debido a que es este objeto el que va a soportar tensiones muy elevadas y se va a deformar, luego se necesita la máxima precisión que sea posible sin incrementar excesivamente el tiempo de resolución del análisis. Luego el elemento Placa se mallará con un tamaño tan pequeño como sea necesario.

- Asignación de las propiedades (Mesh Attributes): Como se ha comentado anteriormente, aunque elementos como el punzón y la matriz puedan compartir las mismas propiedades, hay que especificar un material, un tipo de elemento o unas constantes reales distintas para cada uno de ellos. La forma de asignarlos es o bien a

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 62
--	--------------------------------------	--------------------------------

través del Main Menu (Mesh Attributes > Picked Areas) o mediante el comando AATT habiendo seleccionado previamente las áreas correspondientes.

- **Tamaño del mallado (Size Controls):** Se puede modificar el tamaño del mallado según convenga y particularizando en cada área del futuro Elemento (conjunto de áreas que forman un objeto y que comparten las mismas propiedades). Es decir, si hay una zona que vaya a sufrir más tensión (conocido el proceso real que se quiere simular o bien a partir de información conocida), se puede mallar más fino que el resto. Siempre hay que tratar de no sobrecargar los elementos de nodos para evitar que el tiempo de cálculo sea excesivo innecesariamente.
- **Herramienta de mallado (Mesh Tool):** Una vez que se han asignado las propiedades, se procede al mallado de las superficies de los objetos presentes en cada etapa. El programa se referirá a cada uno de ellos como Elementos.

vii) Crear los Componentes

Los Componentes se crean a partir de nodos y se identifican con una etiqueta en la que se puede hacer referencia al objeto del que se trata, por ejemplo: punzón_etapa_2 (punzón que interviene en la embutición de la Etapa_2). Se pueden crear a partir del "Utility Menu" de ANSYS o bien a través del comando CM.

Módulo LS-DYNA:

viii) Crear las Partes

Cada Parte corresponde a un elemento con las mismas propiedades: tipo de elemento, material y constantes reales. Se les asigna un número positivo y mayor que cero, siempre distinto al que ya exista en la base datos para evitar que se sobrescriban.

Se pueden definir mediante el comando EDPART o bien desde el Menú Principal, dentro del módulo LS-DYNA.

ix) Contactos entre superficies

Dado que se trata de un proceso de embutición, es necesario que haya un contacto entre los cuerpos, de forma que el resultado sea la deformación de la placa.


ANSYS LS-DYNA permite representar contactos muy realistas entre Componentes o Partes dependiendo del análisis realizado. En análisis dinámicos explícitos, se indican las superficies en contacto, el tipo de contacto, y otros parámetros relacionados con él.

Se pueden definir desde el módulo de LS-DYNA, en el pre-procesador, o bien a través de la línea de comando EDCGEN. En ambos casos es necesario definir:

■ Tipo de contacto

Existen, principalmente, tres tipos de contactos: Nodo a nodo, nodo a superficie y superficie a superficie (ver también referencia [12]).

- **Contacto de Superficie única (SS):** El contacto de superficie única se establece cuando una superficie de un cuerpo hace contacto ella misma o con la superficie externa de otro cuerpo. El programa determina automáticamente qué superficies del modelo van a entrar en contacto, luego funciona muy bien cuando las condiciones de contacto no son fáciles de predecir. Tiene la ventaja de resolver problemas con grandes deformaciones y no aumenta el tiempo computacional en casos explícitos, siendo una de sus desventajas aumentarlo cuando se trata de un caso implícito.


	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 63
--	--------------------------------------	--------------------------------

- **Contacto Nudo a superficie (NTS):** El contacto nudo a superficie se produce cuando un nudo de la superficie de contacto de un cuerpo del modelo (Contact Surface) penetra en la superficie objetivo (Target Surface) de otro. Luego es necesario conocer de antemano y definir estas superficies. Se utiliza en procesos donde se producen grandes deformaciones, deslizamientos y diferentes tipos de malla entre los elementos a analizar. Consideraciones a la hora de definir las superficies:
 - Las superficies planas o cóncavas serán las objetivo y las convexas serán las de contacto.
 - Las superficies de mallado grueso serán las objetivo y las de mallado fino serán las de contacto.
- **Contacto Superficie a Superficie (STS):** El algoritmo superficie-superficie establece contacto cuando la superficie de un cuerpo penetra en la de otro. Permite grandes deformaciones, no tiene restricciones en cuanto a la geometría de las áreas en contacto y funciona muy bien con áreas de contacto relativamente grandes. Exige la definición de componentes nodales y partes para establecer las superficies de contacto y objetivo. Es muy eficiente en cuerpos que experimentan deslizamiento relativo, como un bloque que desliza en un plano.

De los tres tipos de contacto se va a escoger, dado el proceso que se quiere simular, el contacto Superficie a Superficie.

Opciones de Contacto

- **Contacto General:** Se trata de un algoritmo de contacto extremadamente rápido y robusto en el que hay que definir la orientación de las superficies en las que se va a producir el contacto. Cuando se utilizan cuerpos sólidos ANSYS LS-DYNA elige automáticamente la orientación correcta. Sin embargo para elementos Shell, hay que determinar la orientación de la superficie de contacto ya que no lo hace el programa.
- **Contacto Automático:** La principal diferencia con el anterior es que en el Contacto Automático el programa determina automáticamente la orientación de la superficie de contacto, revisa y evalúa ambas caras, de los elementos Shell. Permite el contacto entre cuerpos rígidos y deformables.
- **Contacto de Desgaste:** Resuelve contactos entre superficies con resultado de rotura. El contacto continúa con lo que queda en el interior de los elementos. Este contacto se debe utilizar con cuerpos sólidos en los que se producen problemas de penetración y otras aplicaciones con resultado de fallo.
- **Contacto Rígido:** Se utiliza normalmente en análisis dinámicos en los que intervienen cuerpos rígidos. Se puede incluir la absorción de energía de los cuerpos en los que se produce el contacto sin tener que emplear elementos deformables. No permite contactos entre cuerpos rígidos y deformables.
- **Contacto “enlazado”:** Este tipo de contacto “pega” los nodos de la superficie de contacto a los nodos de la superficie objetivo. El efecto de atar “pegar” el contacto es que las superficies objetivo pueden deformarse y los nodos “esclavos” son forzados a seguir la deformación
- **Contacto “enlazado” con rotura:** Es idéntico al anterior, exceptuando que los nodos de la superficie de contacto están “pegados” a las superficies objetivo sólo hasta que se produce la rotura, una vez que se ha superado la rigidez máxima (a partir de la cual se

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 64
--	--------------------------------------	--------------------------------

considera la rotura del sistema). Se suele utilizar normalmente para representar soldaduras por puntos o conexiones fijadas por pernos.

- **Contacto de arista:** Debe utilizarse cuando el contacto se produce perpendicular a la dirección normal de la superficie del elemento Shell. No es necesario definir las superficies de contacto o las superficies objetivo.
- **Contacto “Drawbead”:** Este contacto se utiliza normalmente en operaciones en las que es necesario restringir el movimiento de una de las partes para asegurar el contacto, ya que durante las simulaciones, por ejemplo, de los procesos de estampación, es normal perder en algún momento el contacto entre las superficies.
- **Contacto de Forma:** En este tipo de contacto, las herramientas y los troqueles se definen normalmente como superficies objetivo, mientras que la pieza de trabajo se define como Superficie de contacto, pero la orientación de los mallados de las herramientas debe tener la misma dirección. Las opciones del contacto de Forma están basadas en las del Contacto Automático y son por lo tanto muy robustas en procesos de conformado con metales.

De las nueve opciones de contacto anteriores, se va a escoger el Contacto Automático porque determina automáticamente las superficies que van a entrar en contacto y permite el contacto entre cuerpos rígidos y flexibles. El resto de contactos se adaptan mejor o bien a otros tipos de elementos que no son el Shell o sólo trabajan con cuerpos rígidos...

■ **Coeficiente de rozamiento**

En este caso será necesario definir el coeficiente de fricción estática y dinámica.

■ **Tiempo de Contacto (Inicio y Fin)**

Para definir cada contacto, se puede especificar un tiempo de inicio y de fin del contacto. Esto permite activar el contacto en cualquier momento durante el transcurso del análisis, y desactivarlo más tarde.

■ **Entidades en contacto**

Con excepción del contacto nodo a nodo, en todas las opciones de contacto se necesita identificar las superficies de contacto y las superficies objetivo entre las que se produce el contacto. Esto se puede realizar utilizando componentes formados a partir de nodos y “partes” principalmente.


Consideraciones especiales para los elementos Shell:

Para la definición de contactos automáticos nodo a superficie, superficie a superficie y superficie simple, se tiene en cuenta el espesor tanto para la determinación de las superficies de contacto como para la profundidad del mismo. Por lo tanto, es necesario introducir datos realistas del espesor de los cuerpos Shell rígidos. Un espesor muy pequeño se puede traducir en la pérdida del contacto y un espesor demasiado grande en la degradación de la velocidad de resolución del algoritmo de contacto.

x) Cargas

En programas como ANSYS el concepto carga no se limita a las fuerzas, presiones y momentos que puedan estar aplicados sobre un cuerpo. En realidad, se trata de un concepto más amplio que incluye además de las tres citadas previamente: desplazamientos, rotaciones, velocidades y aceleraciones aplicadas sobre un elemento del conjunto.

Se pueden distinguir dos grandes grupos de fuerzas:

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 65
--	--------------------------------------	--------------------------------

- Las que se aplican directamente sobre los Componentes formados por nodos.
- Las que se aplican directamente sobre cuerpos rígidos (hay que asignarlas directamente sobre los “números de Parte”).

En este proceso se van a utilizar las cargas pertenecientes al segundo grupo antes mencionado, ya que sólo se van a aplicar cargas sobre los punzones, matrices y pisas, que son todos ellos cuerpos rígidos. Cargas empleadas: Fuerzas sobre cuerpos rígidos: RBFZ y desplazamientos sobre cuerpos rígidos: RBUZ definidos a través del “Utility Menu” en la opción “Array Parameters” y aplicados mediante el comando EDLOAD.

Al contrario que en análisis implícitos, todas las cargas en análisis explícitos deben ser dependientes del tiempo. Por este motivo, todas las cargas en ANSYS LS-DYNA se aplican utilizando parámetros vectoriales, uno correspondiente al tiempo y otro a la carga. También, se puede utilizar una curva de datos como entrada de la carga. Los vectores se pueden definir de una forma más precisa, introduciendo un número mayor de entradas. Pero si no se necesita tanta precisión se puede crear el vector con menos entradas, sabiendo que el programa interpolará los datos necesarios para realizar la simulación.

4.1.2.2. Solución

En el módulo de solución del programa entre las múltiples opciones que existen, las que principalmente se van a emplear en las simulaciones son:


- Opciones de análisis (analysis options)
- Solución (solve).
- Controles de Tiempo (Time Controls > Solution time).
- Controles de Salida (Output Controls > File Output Frequency).

xi) Opciones de análisis

Al realizarse simulaciones concatenadas correspondientes a las cuatro etapas de la embutición de la chapa, va a ser necesario transferir el estado de la chapa de la simulación anterior (por ej. Etapa_0) a la siguiente (Etapa_1). Por lo tanto hay que importar los datos de la embutición anterior y aplicar los resultados de tensión-deformación a la nueva simulación. De esta forma, el nuevo golpe de prensa se realiza sobre la placa deformada de la etapa anterior, con las condiciones de contorno de la actual (ver también referencias [13] y [14]).

Hay que destacar que en este proceso el cambio de geometría de los troqueles de un paso a otro es completo. Cambian tanto la forma de los punzones, matrices y pisas como la posición en la que se van a situar con respecto a la chapa debido también a que ésta va a tener una forma distinta después de cada golpe de prensa. Entonces hay que eliminar toda la geometría correspondiente a los troqueles e importar la nueva (actualizando todas las propiedades y parámetros que sean necesarios) en cada simulación. Como en este proceso el cambio de geometría será completo, el programa puede que dé ciertos problemas a la hora de comprobar que, exceptuando la placa, el resto de las “Partes” cambia de forma, de posición y de número de nodos.

La transferencia del estado anterior de la chapa al siguiente, tratándose de una resolución doble explícita va a realizarse con la opción de los comandos EDSTART (reinicio de la simulación) y EDIS (guarda el estado de deformación de la Parte elegida) que va a explicarse, en detalle, a continuación.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 66
--	--------------------------------------	--------------------------------

Reinicio de la simulación (Restart Options):

La opción reinicio (restart) puede emplearse, para:


- Completar un análisis que ha terminado o que requiere más memoria que la que por defecto establece el programa.
- Diagnosticar un análisis que terminó con fallos.
- Realizar un análisis por etapas y ver los resultados al final de cada etapa.
- **Cambiar el modelo y continuar con otro análisis.**

Cada cierto tiempo LS-DYNA crea un archivo “dump”, que contiene una base de datos completa para poder utilizar en un reinicio de simulación (Restart Analysis). Por defecto escoge una frecuencia de generación de estos archivos, pero se puede modificar si por algún motivo se requiere un mayor número de estos archivos.

Consultando el manual de LS-DYNA (ANSYS LS-DYNA User’s guide) se puede ver que hay cuatro niveles de aplicación de la opción Restart:

- **“New Análisis” (Nuevo análisis, nivel 0):** Se puede utilizar para modificar la memoria disponible en el análisis. Por ejemplo, se puede incrementar el valor de memoria si el programa lo requiere, mostrando una advertencia “revisar el fichero de mensaje” e “aumentar el tamaño de memoria” o cambiar el factor de escala para el tamaño de los archivos binarios (dump files).
- **“Simple Restart” (Reinicio Simple, nivel 1):** Es aquel en el que la base de datos no sufre variaciones. Se utiliza normalmente cuando el análisis se interrumpe por algún límite de CPU definido o para realizar algún control sobre la simulación (pulsando Ctrl C en el teclado e introduciendo SW1). Para solucionar un problema surgido por una interrupción prematura, hay que introducir la solución en el procesador y utilizar el comando [EDSTART,1,,,d3dumpnn] seguido de resolver (SOLVE). El análisis continuará y todos los resultados se añadirán a los existentes en los archivos Jobname.rst y Jobname.his.
- **“Small Restart” (Reinicio reducido, nivel 2):** Se utiliza cuando hay que realizar pequeños cambios necesarios en la base de datos, debido a: cambios en el intervalo de los archivos de salida, introducción de nuevas restricciones, cambio de las velocidades iniciales o de las curvas de carga, etc. Para este tipo de “reinicio” se debe utilizar o bien el Menú Principal (Main Menu) o la línea de comando [EDSTART,2,,,d3dumpnn], seguido de algunos comandos necesarios para cambiar la base de datos, después hay que introducir el comando resolver (SOLVE).
- **“Full Restart” (Reinicio Completo, nivel 3):** Es apropiado cuando hay que realizar numerosos cambios en la base de datos. Por ejemplo, se necesita borrar alguna/s partes del modelo, aplicar cargas distintas, introducir nuevos elementos, etc.

Para iniciar un “Full Restart”, se debe utilizar el comando [EDSTART,3] seguido del último archivo dump generado en la simulación anterior. De esta forma, se comenzará el nuevo análisis justo a partir del último estado tensional almacenado en la base de datos. En cada análisis se generan archivos “Jobname.k”, “Jobname.his”, “Jobname.rst” que podrían ser sobrescritos por la nueva base de datos si no se les cambia el nombre. LS-DYNA lo cambia automáticamente cuando se inicia el “Full Restart”, es decir, el fichero Jobname_nn aumenta en uno su terminación numérica (nn = 01, 02, 03...). Una de las ventajas de LS-DYNA es que crea nuevos archivos de resultados en lugar de añadirlos

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 67
--	--------------------------------------	--------------------------------

como en el caso del “Simple Restart”. La base de datos del análisis anterior encaja perfectamente con la del nuevo.

El caso de embutición que se está considerando en este proyecto, necesita un “Full Restart” debido al cambio total de geometría (troqueles) de una etapa a otra, pero necesita mantener siempre el estado tensional de la simulación anterior de la chapa (guarda la forma del golpe de la etapa anterior). A continuación se presenta un pequeño fragmento del archivo .txt generado al programar la segunda simulación (Etapa_1), en el momento de realizar el “Full Restart” realizado al comienzo de la Etapa_1. La secuencia de comandos al iniciar el “Restart” de nivel 3, sería:

```

!*****
!*                               ETAPA_1: Segunda Embutición                               *
!*****

!* el Paso_1: Main Menu > Solution > Análisis Options > Restart Options
Full Restart
/ SOLU
EDSTART,3,,7,d3dump17
FINISH

```


Justo en este momento los archivos (.k), (.his), (.rst) se modifican de esta forma (donde Jobname = Etapa):

- Etapa_00.k → Etapa_01.k
- Etapa_00.his → Etapa_01.his
- Etapa_00.rst → Etapa_01.rst

Hay que tener en cuenta ciertas restricciones y advertencias que presenta el programa cuando en un análisis se necesitan realizar simulaciones concatenadas mediante un “Restart” de nivel 3. Han de ser tenidas en cuenta desde la primera simulación porque no podrán ser modificadas en las sucesivas. Esto obliga a tener muy claros los pasos que se van a dar para no tener que repetir innecesariamente el análisis completo.

Restricciones:

- Especificaciones de Contacto: No se pueden añadir o borrar especificaciones de contactos (EDCGEN y EDDC) en el “Full Restart”. Esto implica, que el número de “Parts” existentes en el primer análisis no se podrá modificar porque no podrán intervenir en el resto de los análisis. Hay que saber de antemano el número de componentes total del estudio para definirlos desde la primera simulación.
- Velocidades iniciales: No se pueden cambiar las velocidades iniciales en el “Full Restart”. Para cualquier parte del modelo que proceda del análisis anterior, la velocidad correspondiente a esa parte al principio del “Full Restart” tiene que ser la misma que la final del análisis anterior. No se puede definir velocidad inicial para nuevos nodos o partes añadidas en el “Full Restart”; se asume que la velocidad de las nuevas entidades del modelo es nula.
- Mallado adaptativo: No se puede utilizar un mallado adaptativo ni en el análisis previo a un “Full Restart”, ni después de haberlo realizado.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 68
--	--------------------------------------	--------------------------------

- “Mass Scaling”: Como en un “Small Restart”, el “Mass Scaling” (EDCTS) sólo se puede utilizar en un “Full Restart” si se ha utilizado ya en el primer análisis.

De las restricciones que se acaban de explicar, hay que prestar especial atención a la primera que es la que va a afectar al proceso de simulación de embutición de la placa. Se definirán todos los contactos en la primera etapa (todos los componentes con la chapa) y no podrán ser modificados en las posteriores.

Advertencias:

Hay que tener en cuenta estas advertencias desde la primera simulación:

- Si se sabe por anticipado que se necesita borrar ciertos componentes del modelo en un futuro “Restart Analysis”, hay que utilizar: distinto número de tipo de elemento, número de material, o número de Constante Real para estos objetos en el análisis original, incluso si comparten los mismos atributos que otros elementos del modelo. Esto permitirá que se asigne un único número de Parte a estos elementos, que podrán ser borrados después sin alterar las otras Partes del modelo.
- Si se necesita añadir más objetos al modelo durante el “Full Restart”, hay que utilizar diferentes tipos de número de tipo de elemento, número de material, o número de constante real para estos elementos en el análisis original, incluso si comparten las mismas propiedades con otros elementos del modelo. De esta, forma se les podrá asignar el mismo número de Parte sin alterar las existentes previamente en el análisis.

El programa asume que de un análisis a otro, se van a tener el mismo número de elementos, con la misma forma, en el mismo orden y en la misma posición. Este no es el caso que se está estudiando, porque como ya se ha comentado, cambia completamente la geometría (punzones, pisas y matrices) de una etapa a otra, la posición y, en ocasiones, el orden. Esto complicará la resolución del análisis porque el programa puede encontrar ciertas incompatibilidades al tener algunas Partes con distinto número de nodos, en posiciones distintas y con distintas cargas asociadas.

El “Full Restart” queda completamente definido cuando se inician los esfuerzos procedentes del análisis anterior (comando EDIS). Esto se lleva a cabo en dos fases:

– Primera fase:

Especificar junto con el comando EDSTART, el nivel de iniciación del análisis (nivel 3 para el “Full Restart”) y el archivo d3dumpp con el número más elevado, ya que LS-DYNA genera más archivos “dump” (archivos de resultados para los “Restart Análisis”) de los especificados.

– Segunda fase:

Introducir con el comando EDIS la iniciación de los esfuerzos del estado anterior. Esto significa dar continuidad respecto a la deformación nodal y esfuerzos entre las dos simulaciones. Por lo general, el número de Parte/s que acompañan al comando EDIS (sólo aplicable tras un “Restart” de nivel 3), son aquellas que deben permanecer inalteradas de una simulación a otra. Es el caso de la chapa, en ella no se puede modificar ninguna de sus propiedades y es en la que debe haber continuidad en la tensión/deformación a lo largo de las simulaciones.

Para que todos los comandos se apliquen al “PART ID” correcto, incluyendo los contactos, es necesario actualizar los números de Parte una vez que se ha borrado la

geometría adecuada de la etapa anterior e importado la nueva (se considera que ya está el análisis definido) con el comando [EDPART, UPDATE].

Dada la importancia de este apartado se va a presentar un pequeño esquema aclaratorio de los pasos que hay que realizar para realizar un “Full Restart” (“Full Restart”):

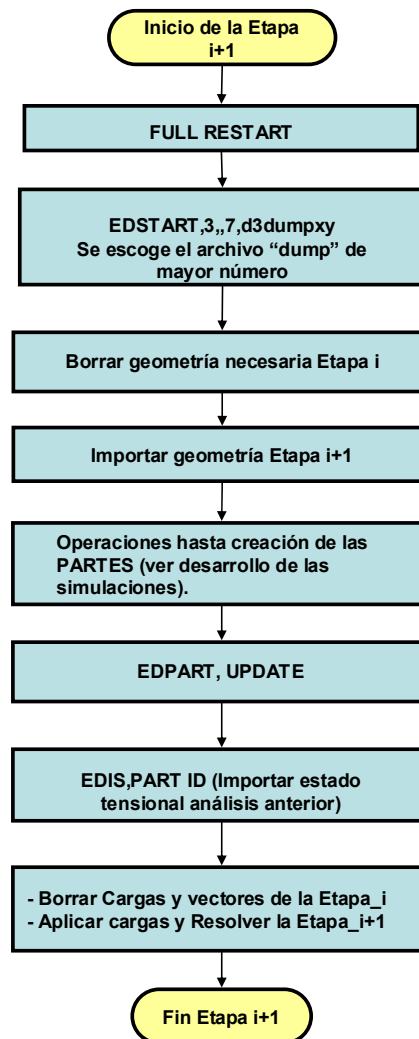



Figura 4-5 Esquema general de realización de un “Full Restart”

xii) Controles de tiempo, de salida de datos y solución

- **Controles de tiempo (Time Controls):** El tiempo de duración de la simulación, que no tiene por qué coincidir con el del proceso, se controla con esta opción del programa. En ocasiones, sobre todo cuando la simulación tarda mucho en realizarse y no siendo necesario, por ejemplo, simular la retirada completa del punzón, se puede introducir un tiempo de duración del proceso menor para calcular sólo la parte que interesa.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 70
--	--------------------------------------	--------------------------------

Controles de Salida (Output Controls):

Desde esta opción del programa, se puede controlar la frecuencia de generación de ciertos archivos de salida del programa, como puede ser:

- Intervalo de datos de salida en un análisis explícito [comando EDRST].
- Especificar el Intervalo tiempo-histórico de salida. [comando EDHTIME].
- Frecuencia de generación de los archivos “dump” para los futuros “Restart Analysis” [comando EDDUMP].

xiii) Solución (SOLVE)

Una vez que se ha completado la definición de la simulación y se ha revisado para evitar fallos en la definición de alguno de los parámetros, sólo hay que introducir el comando [SOLVE].

Más detalles de los Controles de Salida y del módulo de Solución en el desarrollo de las etapas de las simulaciones.

4.1.2.3. Post-procesador

xiv) Resultados

Una vez que ha finalizado el análisis, sólo hay que introducir el archivo de resultados (Data & File Options), leer este archivo (read results > last set) en el último paso almacenado si se quiere conocer el estado final de la chapa, o en cualquier intervalo de tiempo en el que el programa haya generado un archivo y finalmente visualizar la simulación.

Se puede conocer el desplazamiento de cualquier nodo de la placa, las tensiones generadas, resultados gráficos, la simulación con el movimiento de todos los componentes del sistema y la deformación progresiva de la placa. En el apartado de resultados se verán con más detalles las opciones escogidas.

4.2. Descripción de la metodología – Pasos a seguir

El esquema de la Figura 4-7 muestra todos los pasos que se van a seguir hasta conseguir la pieza final objeto del proyecto, que tendría la siguiente forma.

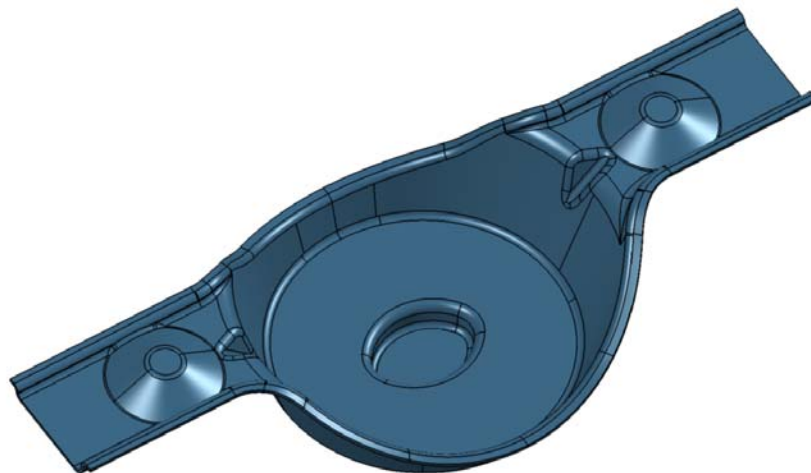


Figura 4-6 Pieza final que se debería obtener tras las cuatro etapas de la embutición

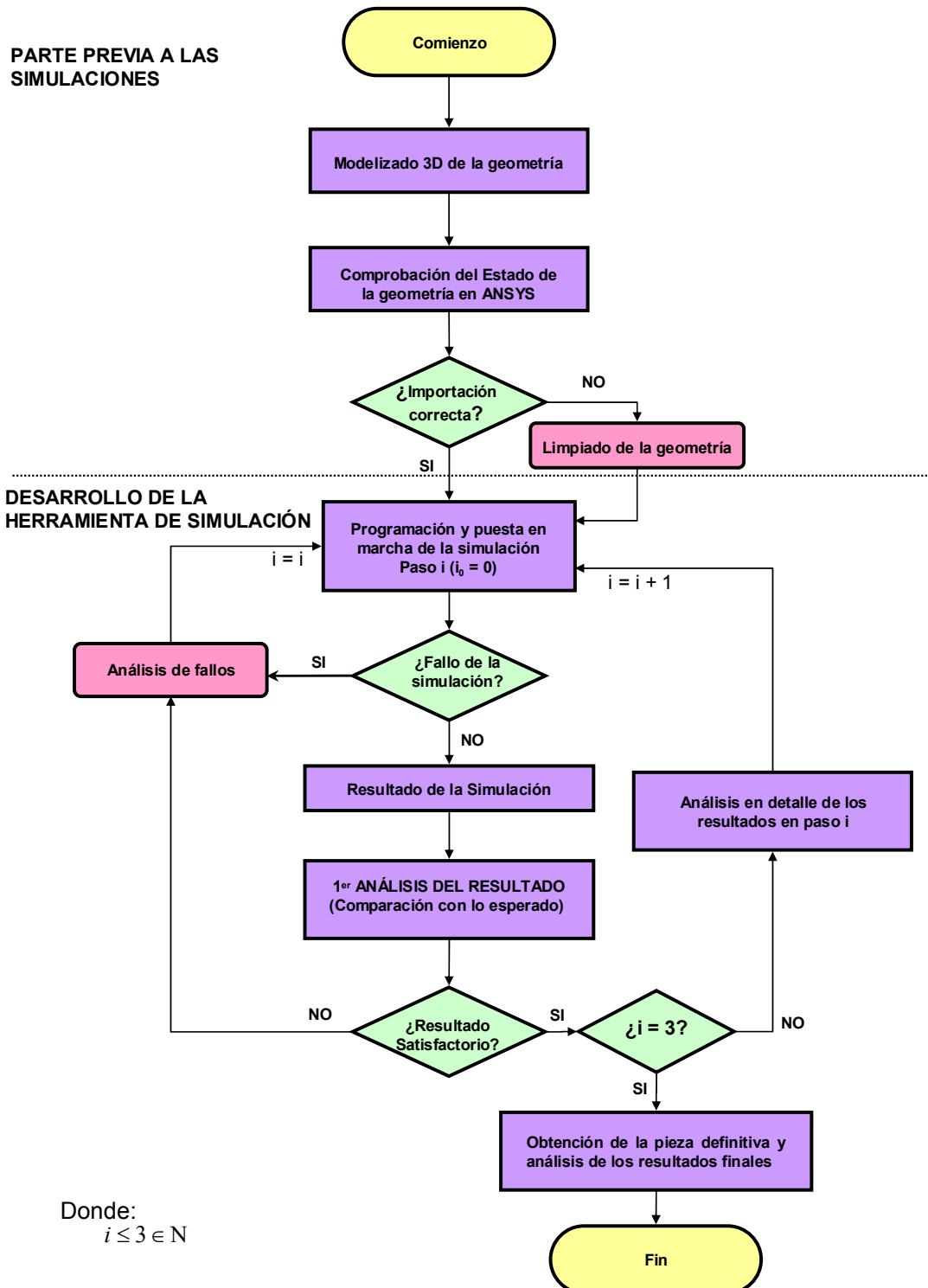



Figura 4-7 Esquema general del desarrollo del proceso de simulación de los cuatro pasos de la embutición

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 4</p> <p>Página: 72</p>
--	---	---------------------------------------

En los siguientes apartados se explica cada uno de los pasos de la metodología empleada de acuerdo con la figura anterior.

4.2.1. Modelizado 3D de la geometría

La modelización del sistema completo (herramientas y placa con sus propiedades), comienza por la creación de un CAD (en este caso por parte de la empresa que diseña los troqueles) que refleje de una forma lo más precisa posible la realidad. Se ha dibujado la geometría en CATIA (programa de diseño en 3D) y se generan unos archivos con formato estándar IGES que pueden ser importados en ANSYS.

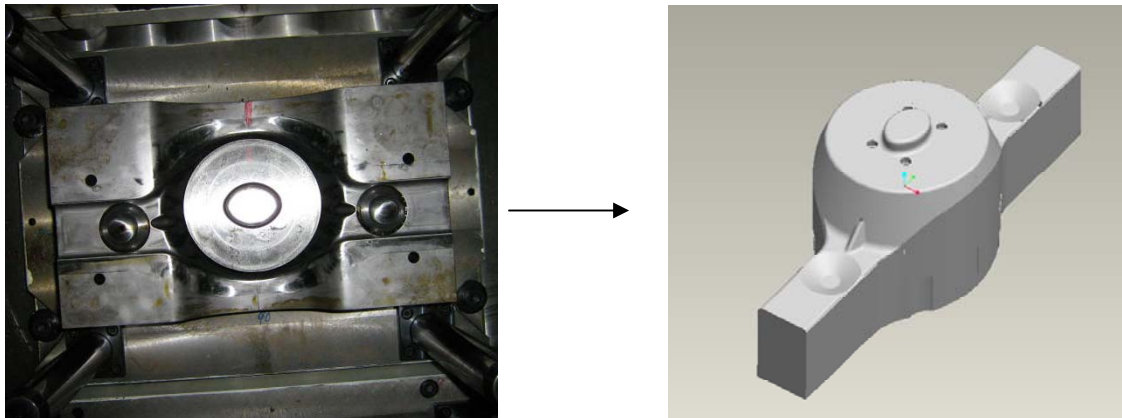


Figura 4-8 Punzón real y modelización 3D del Punzón_Etapa_1

Esta operación se lleva a cabo con todos los troqueles que intervienen en la estampación.

La placa, se modeliza en ANSYS a partir de un escaneado sobre la placa real antes de ser deformada. Tal y como se puede ver en la siguiente figura:

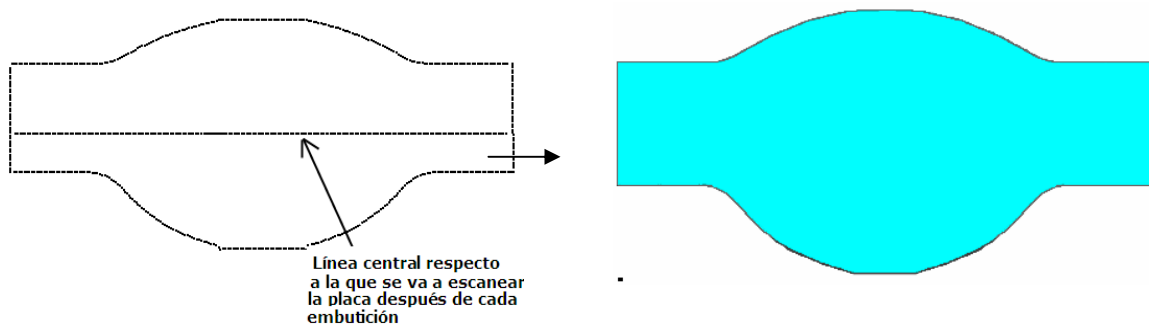



Figura 4-9 Placa creada a partir del escaneado inicial de la real

4.2.2. Comprobación del estado de la geometría en ANSYS

Se dispone del CAD de todas las herramientas que se van a emplear durante el proceso de embutición y un contorneado de la placa a partir del cual se va a generar un área que se embutirá en los sucesivos pasos de la simulación del proceso. La geometría está dibujada en CATIA e importada en ANSYS en formato IGES.

Como se ha comentado en el apartado 4.2.1, se trata de una embutición en cuatro etapas con un conjunto de herramientas distinto en cada una de ellas. Al importar la geometría en ANSYS, producen una serie de interferencias y discontinuidades entre áreas que hay que solucionar,

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 73
--	--------------------------------------	--------------------------------

para evitar problemas con el mallado posterior de estos elementos, sin modificar la geometría inicial.

■ Etapa 0 (primera embutición)

La geometría de la Etapa_0 fue arreglada en el proyecto “Simulación de un proceso de embutición mediante LS-DYNA” por su autor [1], razón por la que las herramientas de esta etapa se han utilizado sin modificaciones.

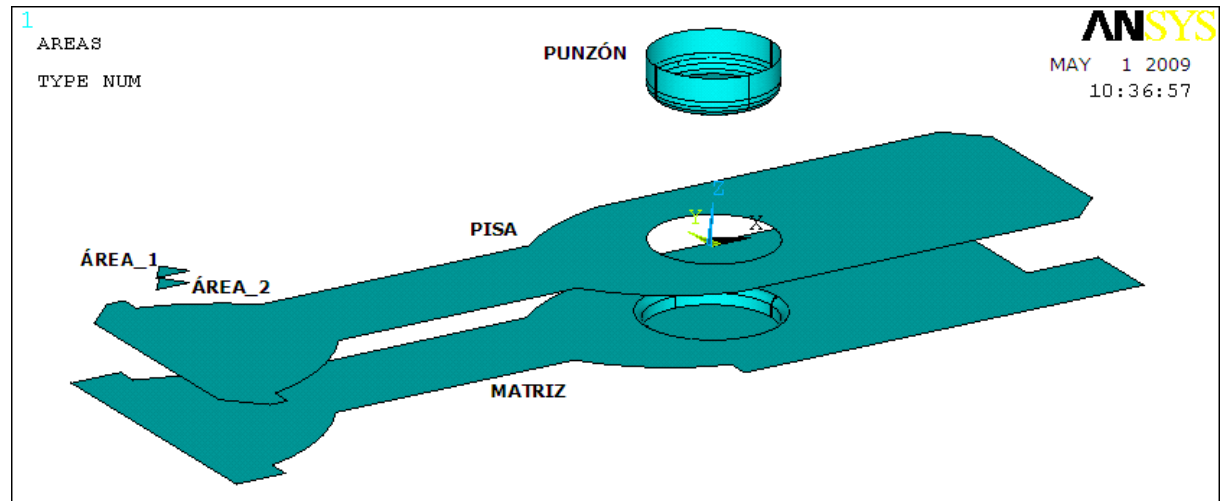


Figura 4-10 Herramientas Conjunto_Etapa_0

Nota: No hay información del CAD inicial que se modificó.


Sólo hay que destacar la creación e introducción de dos áreas (Áreas 1 y 2) como elementos que van a formar parte del Conjunto_Etapa_0. Si se observan todas las etapas, se puede ver que en la uno hay seis componentes (punzón, pisa_punzón, pisa_extra, matriz, pisa_matriz y placa) y tiene que haber el mismo número en todas las etapas. Esto se debe a las características de definición del proceso de simulación, ya que como se describe en el punto (xi) del apartado 4.1.2.2 Solución se necesita tener el mismo número de elementos en todas las simulaciones al no poder modificar los contactos definidos desde la primera etapa.

Estas dos áreas creadas van a intervenir indirectamente en el proceso, es decir, se les va a asignar las propiedades apropiadas (como si fueran dos elementos reales del conjunto) y se va a definir un contacto de cada una con la placa. La diferencia con el resto de los elementos que intervienen activamente en la simulación, es que a estas dos áreas no se les va a asignar ningún vector. Luego van a estar en su posición inicial durante todo el proceso.

Como se puede observar en la Figura 4-10, se han representado las herramientas mediante áreas y no volúmenes. A pesar, de que se explicará más adelante, se debe aclarar que es necesario que el problema sea lo más simple posible geométricamente para que el cálculo sea lo más rápido y fiable posible. Los troqueles se van a representar como cuerpos rígidos (indeformables), por lo tanto, cuanto menor sea su espesor real en la simulación más se simplifica la resolución de la simulación.

■ Etapa 1 (segunda embutición)

En la segunda etapa, las modificaciones fueron realizadas también para el proyecto anteriormente citado. En este caso sí se pueden ver las modificaciones que se han tenido que

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 74
--	--------------------------------------	--------------------------------

realizar sobre la geometría original, que incluía: Punzón, Pisa_Punzón, matriz y Pisa_matriz, ya que se tiene información del CAD original importado en ANSYS antes de ser limpiado.

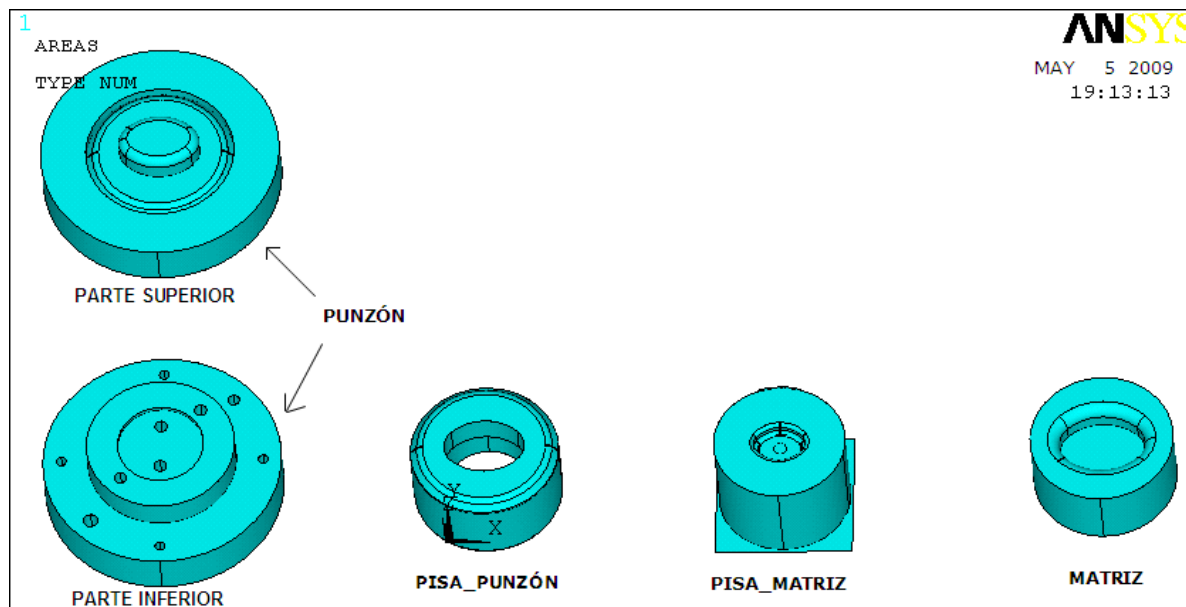


Figura 4-11 Herramientas Conjunto_Etapa_1 (geometría sin limpiar)

Como se puede ver en la Figura 4-12, la geometría se ha simplificado según áreas (paredes exteriores delgadas) y hay un elemento más que no hay en el CAD inicial. Se trata del Pisa_Extra, que se explicará a continuación:

- Pisa_Extra: En un principio la simplificación del punzón a la zona central parece correcta, pero el punzón real que fabrica la pieza, no se limita a esta zona si no que continúa horizontalmente de forma que sujeta la chapa al ser embutida. Entonces, se hace necesario crear un área que simule esa superficie horizontal, para evitar que la placa se rompa durante el proceso. Quedando siempre claro que a pesar del nombre asignado al componente, éste es una parte del punzón que no lleva aplicado un vector de fuerza. Se limitará a trabajar como el resto del punzón en esta etapa.

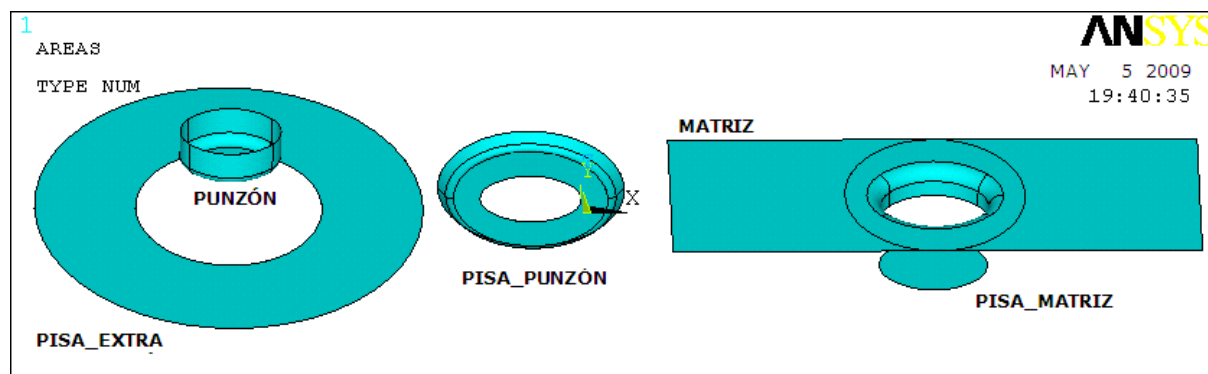



Figura 4-12 Herramientas Conjunto_Etapa_1 (geometría limpia)

	UNIVERSIDAD CARLOS III	Capítulo : 4
	MADRID	Página: 75

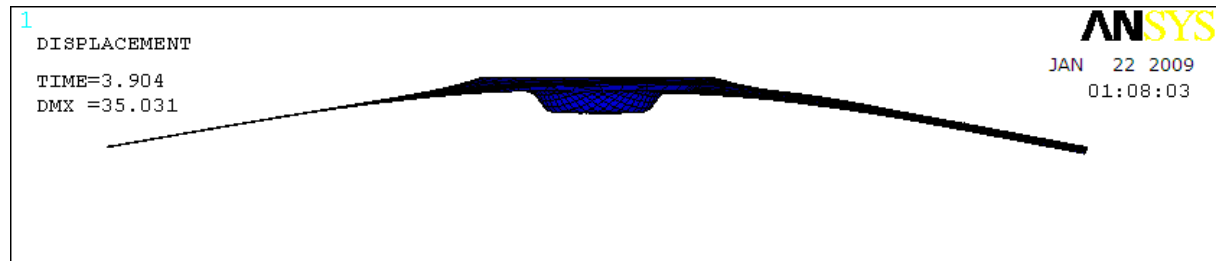


Figura 4-13 Placa alabeada Etapa_1 (matriz sin superficie horizontal añadida)

Otra diferencia encontrada con respecto a la geometría inicial es el área plana que se ha añadido en la superficie de la matriz para evitar el alabeo que sufre la placa, durante la simulación (ver Figura 4-13) teniendo sólo el CAD inicial de la parte central de la matriz. Es decir, esto no sucede en la realidad, ya que la matriz no se limita sólo a su parte central si no que continúa con una superficie horizontal sobre la que se apoya la chapa durante la embutición.

No sólo hay que simplificar la geometría mediante la eliminación de las áreas que no sean necesarias, si no que hay que arreglar las zonas en las que el programa no sea capaz de proporcionar una continuidad a las superficies, cerrando las áreas por sus líneas que sólo pueden tener intersecciones formadas por un punto. Las áreas aparecen solapadas y eso se traduce en discontinuidades en el mallado. Como se puede ver en la siguiente figura:

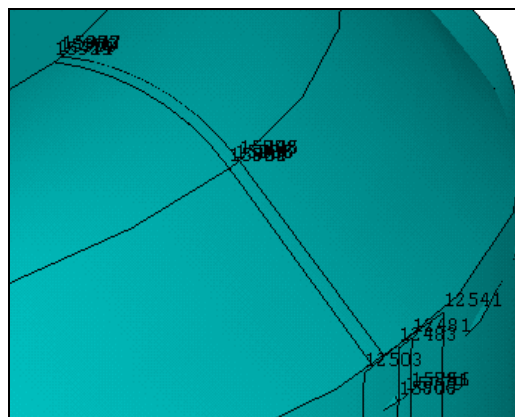


Figura 4-14 Área importada desde ANSYS directamente (sin limpiar)

Por lo tanto hay que arreglar todas esas zonas después de haber eliminado las que no sean necesarias.

■ **Etapa 2 (tercera embutición)**

La Figura 4-15 muestra la geometría correspondiente a la Etapa_2, con la apariencia que muestra el archivo IGES importado en ANSYS. Como en las dos etapas anteriores, se debe limpiar la geometría para simular el caso de una forma sencilla sin olvidar que se quiere reflejar lo más fielmente posible lo que sucede en la realidad.

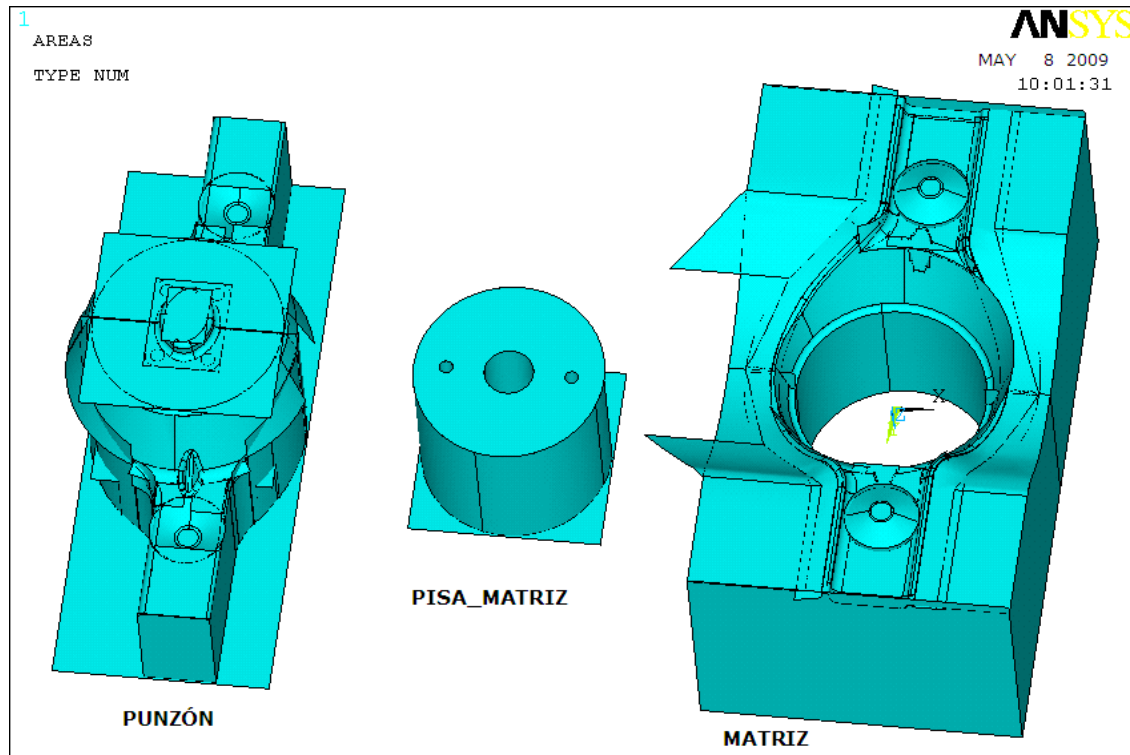


Figura 4-15 Herramientas Conjunto_Etapa_2 (geometría sin limpiar)

La Figura 4-16 muestra la geometría una vez que ha sido limpiada. Se pueden distinguir fácilmente dos diferencias con respecto a la figura anterior:

- Se ha añadido un Pisa_Extra, que va formar parte del punzón, porque al utilizar la geometría sin él, la simulación no se desarrolla correctamente debido a que las arrugas (en cierto modo normales debido a la magnitud de la embutición) lo son excesivamente al utilizar el punzón sin el Pisa_Extra. En realidad, el punzón no termina tal y como se presenta en el CAD de la Figura 4-15, si no que termina en una superficie horizontal que dobla la placa en los laterales al subir completamente la matriz.
- Se vuelve a emplear una de las Áreas auxiliares para poder mantener los contactos tal y como se han definido en la Etapa_0.

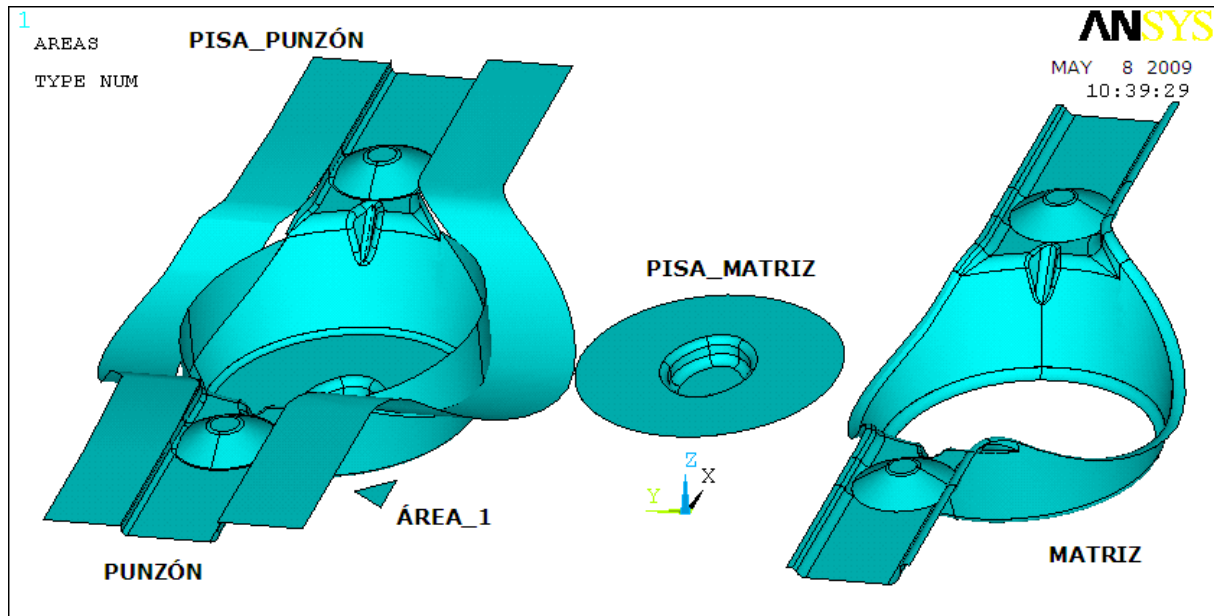


Figura 4-16 Herramientas Conjunto_Etapa_2 (geometría limpia)

■ Etapa 3 (cuarta embutición)

Por último se presenta la geometría del último paso de la embutición. Se realizan las mismas operaciones que en los anteriores para dejarla con el aspecto de la Figura 4-18. No se va a simular esta embutición, tal y como se explica en el apartado 4.2.3, porque en la etapa tres la placa, debido a diversos motivos que explicarán en los resultados, rompe en ciertas zonas. Esto hace imposible tratar de simular la Etapa_3.

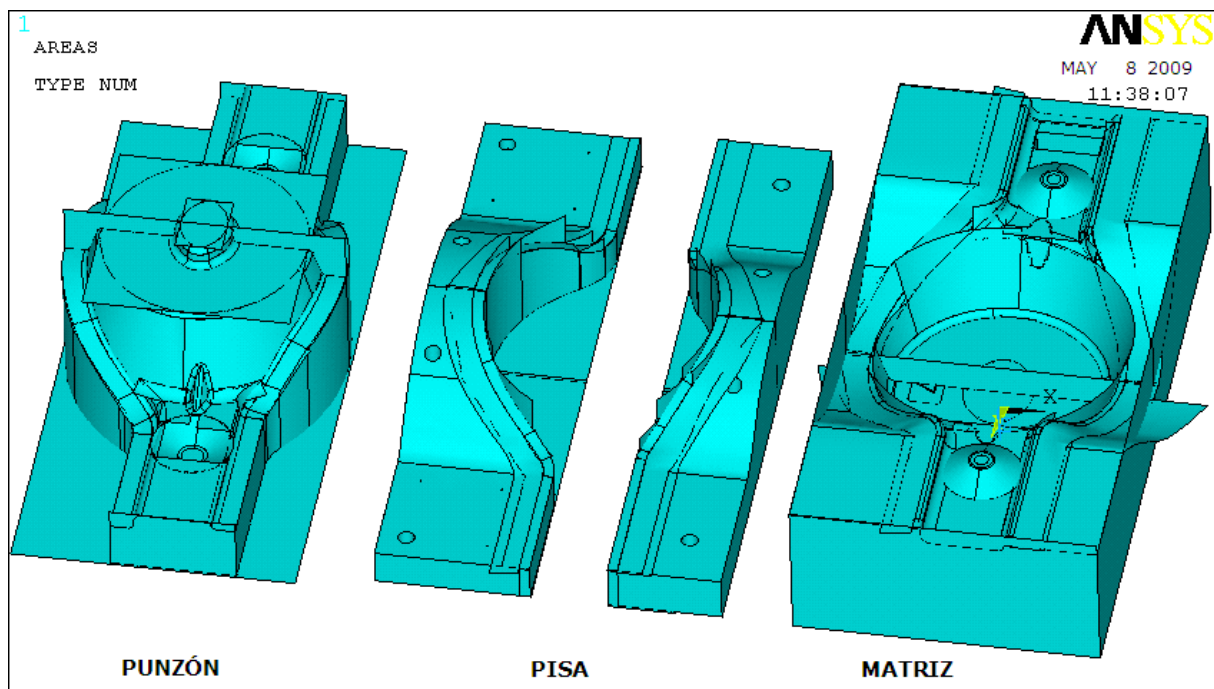



Figura 4-17 Herramientas Conjunto_Etapa_3 (geometría sin limpiar)

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 4</p> <p>Página: 78</p>
--	---	---------------------------------------

Como son tres elementos inicialmente, es necesario incluir las dos áreas auxiliares.

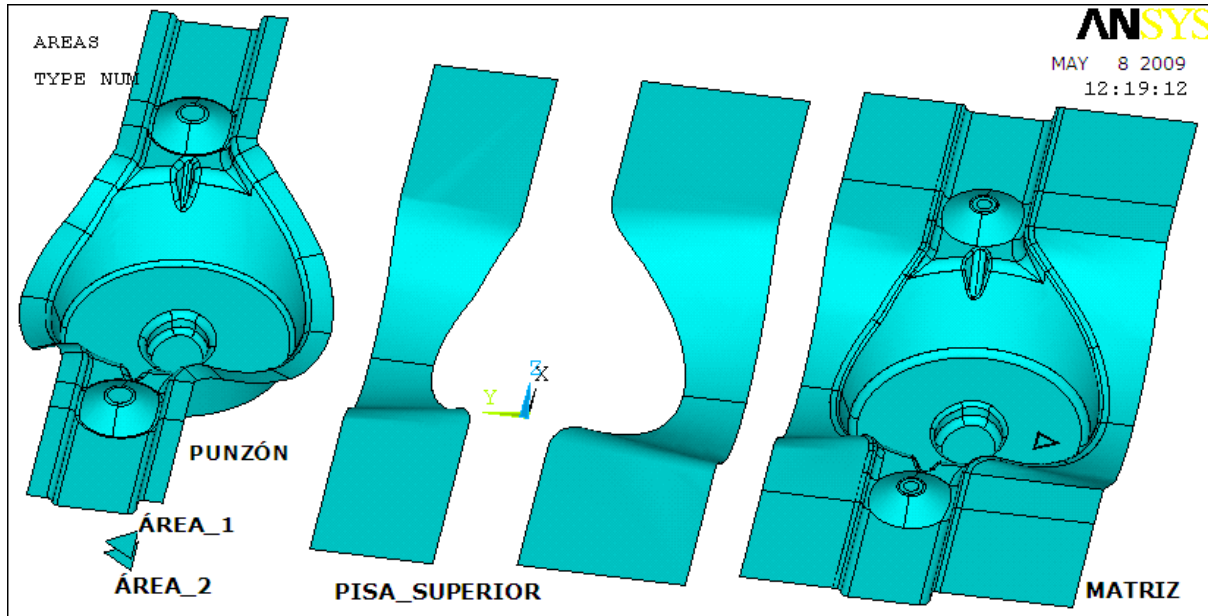


Figura 4-18 Herramientas Conjunto_Etapa_3 (geometría limpia)

Aquí termina la parte previa a las simulaciones. El método seguido ha sido: Importar la geometría, ver si estaba correctamente y en caso negativo “limpiarla”. A continuación se desarrolla la herramienta que va a permitir simular las Etapas.

4.2.3. Desarrollo de una herramienta de simulación mediante el programa de elementos finitos ANSYS LS-DYNA

En este apartado se va a programar y poner en marcha (resolver) las simulaciones correspondientes a los pasos de la embutición necesarios para fabricar la pieza de repuesto objeto del proyecto. Cada paso de la embutición tiene troqueles distintos, modelizados mediante áreas en ANSYS, que irán dando forma en cada paso a la placa. Tratando de llegar a la forma final de la Figura 4-19 (que incluye los punzonados que no se van a simular).

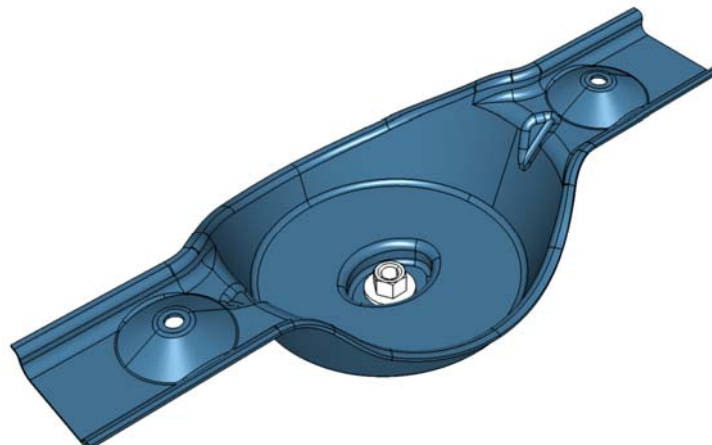



Figura 4-19 Placa con la forma final después de todo el proceso de conformado (incluyendo los punzonados)

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 4</p> <p>Página: 79</p>
--	---	---------------------------------------

La primera vez que se accede a la aplicación ANSYS, hay que abrir e iniciar el programa con la opción ANSYS LS-DYNA PC.

- ANSYS > ANSYS PRODUCT LAUNCHER > ANSYS LS-DYNA PC > RUN

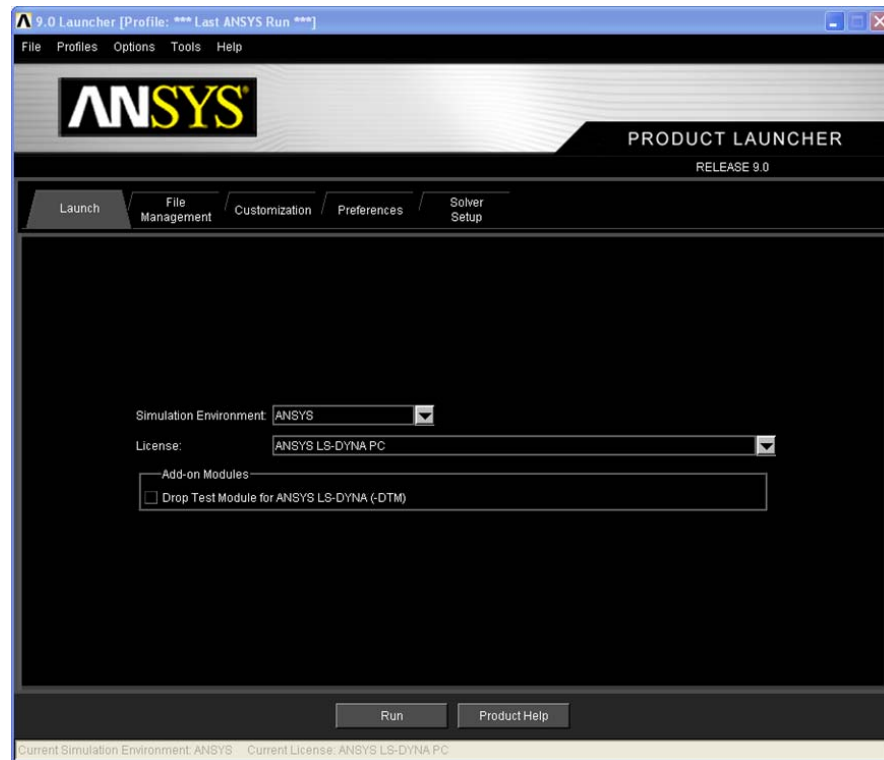


Figura 4-20 ANSYS PRODUCT LAUNCHER

Como esta opción que queda seleccionada por defecto, en sucesivas ocasiones sólo será necesario iniciar:

- ANSYS > ANSYS LS-DYNA PC > RUN

A continuación hay que escoger el tipo de análisis y el método de resolución apropiados para el proceso que se quiera resolver. Como en este caso, se quiere simular la deformación por embutición de una placa, se escoge el análisis estructural y el método de resolución explícito de LS DYNA. Estas opciones quedan definidas por defecto a menos que se cambien al inicio del programa.

- ANSYS > ANSYS Main Menu > Preferences

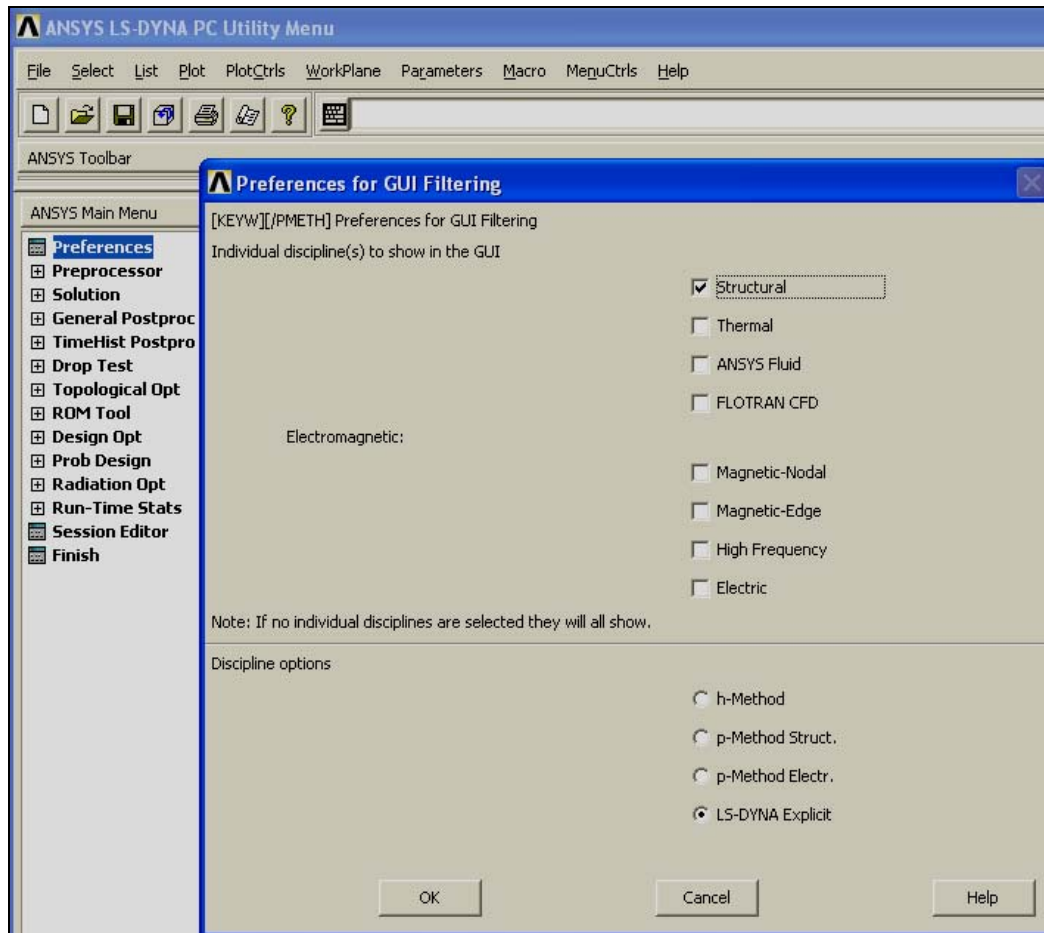


Figura 4-21 Tipos de análisis y métodos de resolución de ANSYS

4.2.3.1. Primera embutición: Etapa_0

Es conveniente cambiar el directorio de trabajo para tener ordenados todos los archivos que se obtienen. Cada simulación genera una gran cantidad de archivos de resultados que el propio programa busca por defecto en la misma carpeta en la que son creados.

- ANSYS Utility Menu > File > Change directory → Etapa_0

A continuación se cambia el nombre del archivo de trabajo, para facilitar el almacenamiento de los mismos y su posterior utilización.

- ANSYS Utility Menu > File > Change Jobname → Etapa_0

i) Generar/Importar la geometría de la Etapa_0

En este caso se va a importar en formato IGES la geometría dibujada previamente en CATIA. Como se ha comentado en el apartado 4.2.1 se ha limpiado previamente la geometría, de forma que una vez que se comienza la programación de cada paso, todos los elementos que intervienen en el proceso estén listos para deformar la placa correctamente.

- ANSYS Utility Menu > Import > IGES > Conjunto_Etapa_0

Como se trata de un conjunto de elementos, es conveniente crear un grupo, que comparta el mismo sistema de coordenadas. La posición de los componentes está determinada por los

vectores de desplazamiento que se definirán al final de cada simulación. Luego hay que tener una idea previa de la situación de cada uno.

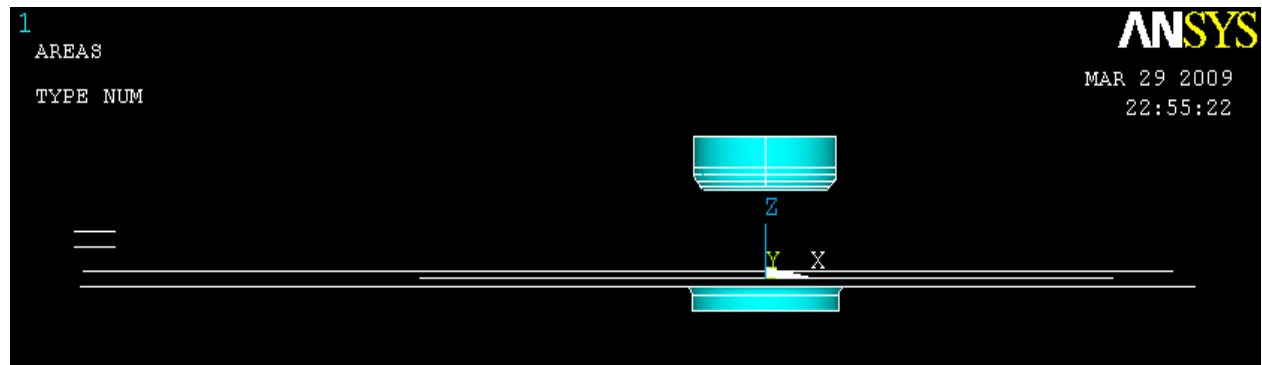


Figura 4-22 Geometría Etapa 0 (montaje final)

ii) Tipo de elemento

Consultando el apartado 4.1.2.1 se puede ver claramente por qué se ha escogido este tipo de elemento para modelizar todos los componentes del proceso. Según el apartado 4.2.2, toda la geometría va a ser representada mediante áreas planas (con un cierto espesor). Los troqueles, a pesar de su apariencia de volumen por ser cuerpos 3D, sólo están formados por paredes exteriores delgadas. La placa se modeliza inicialmente como un área plana con cierto espesor. Esto reducirá el tiempo de resolución del proceso por simplificación de la geometría y reducción del número de nodos resultantes después de mallar las superficies.

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Element type > Add/Edit/Delete > Add > LS-DYNA Explicit > Thin Shell 163

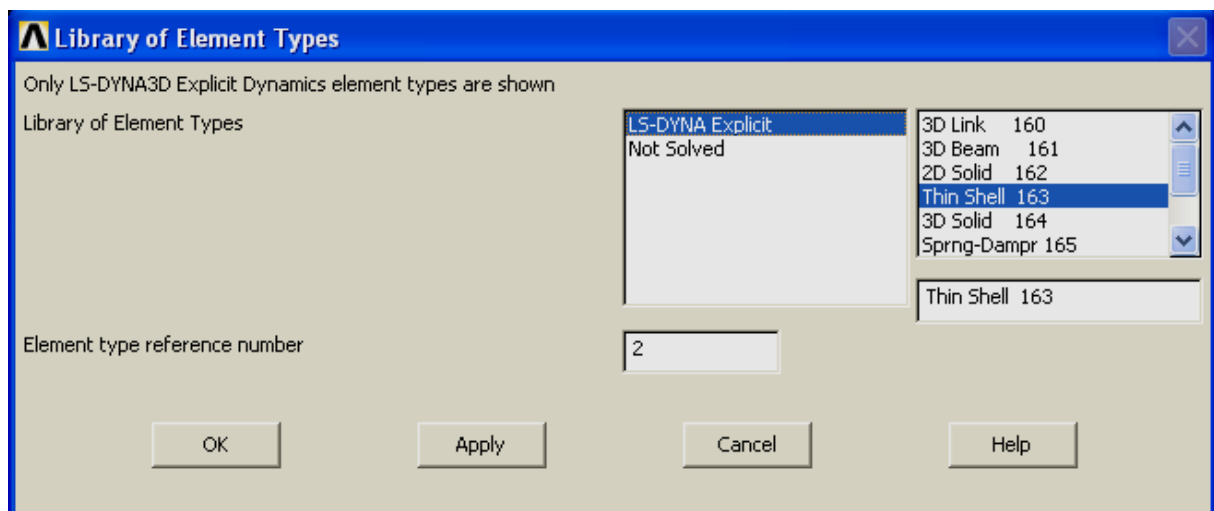


Figura 4-23 Elección del tipo de elemento (Thin Shell 163)

iii) Definir las Constantes Reales

Se definen dos Constantes Reales:

- R1 = 0.001 mm, para definir el espesor de los punzones, pisas y matrices. Se debe introducir un valor lo suficientemente pequeño como para que resulte favorable para el análisis.
- R2 = 2 mm, correspondiente a la chapa ya que es su espesor real.
 - o ANSYS Main Menu > Preprocessor > Real Constant > Add

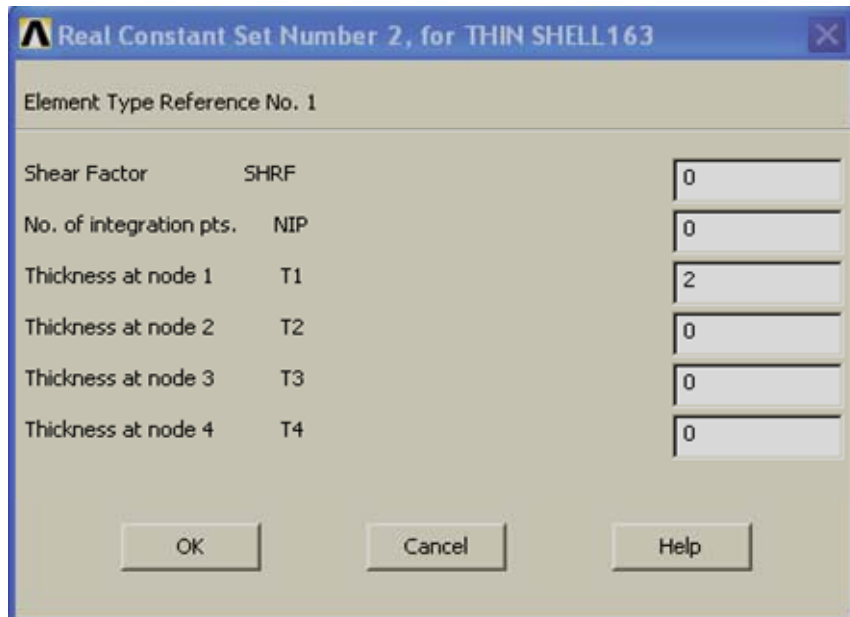


Figura 4-24 Constantes Reales (espesor de la placa)

iv)v) Definir las propiedades del material e imponer las restricciones

- Definición de Material: Como se ha explicado en el apartado 4.1.2.2, se sabe de antemano que hay que borrar e importar nueva geometría, luego es necesario crear tantos materiales como componentes se vayan a borrar e importar, a pesar de que tengan las mismas propiedades (esto permite que se les pueda asignar un mismo número de Parte necesario para mantener los contactos entre “Partes”).

Los materiales quedarían asignados de la siguiente forma:

- Material 1: Placa (Plastic Kinematic).
- Material 2: Matriz (Rigid Material).
- Material 3: Pisa (Rigid Material).
- Material 4: Punzón (Rigid Material).
- Material 5: Área 1 (Rigid Material).
- Material 6: Área 2 (Rigid Material).

Placa

- o ANSYS Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models > Add > LS-DYNA > Nonlinear > Inelastic > Kinematic Hardening > Plastic Kinematic

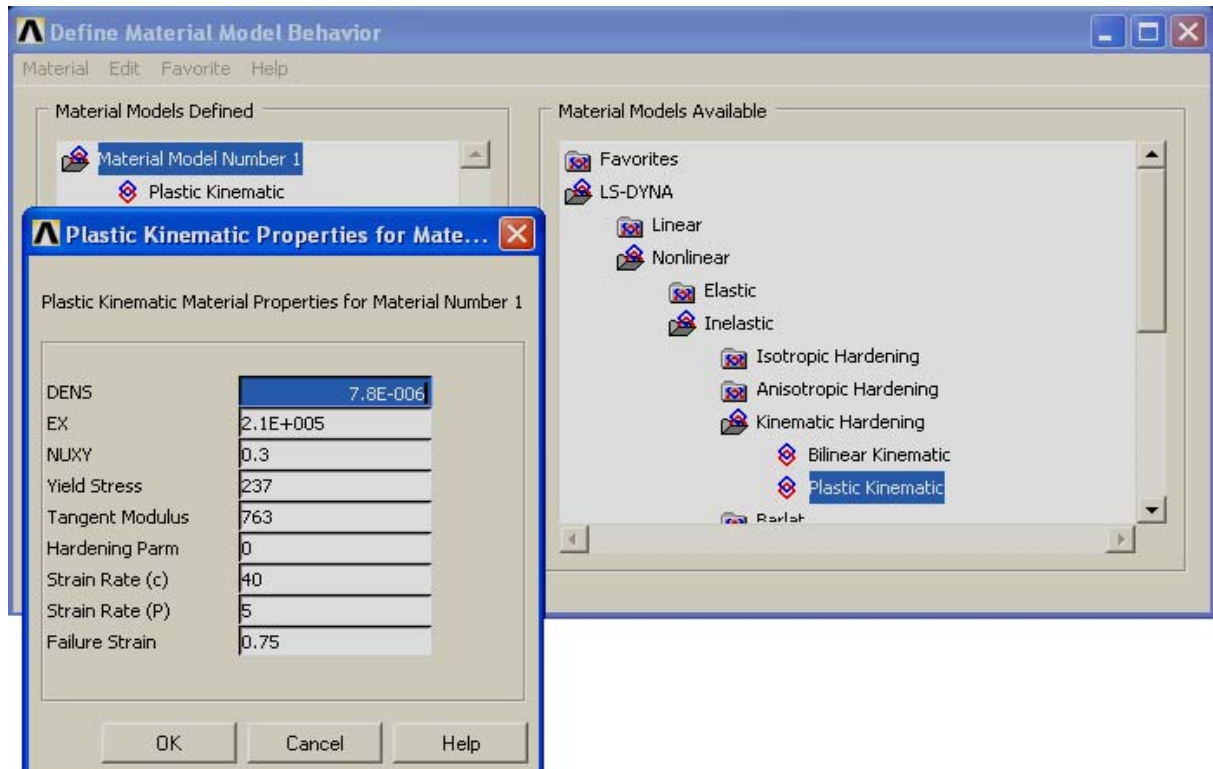


Figura 4-25 Material Plastic Kinematic para la placa

Herramientas

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models > New Model > LS-DYNA > Rigid Material

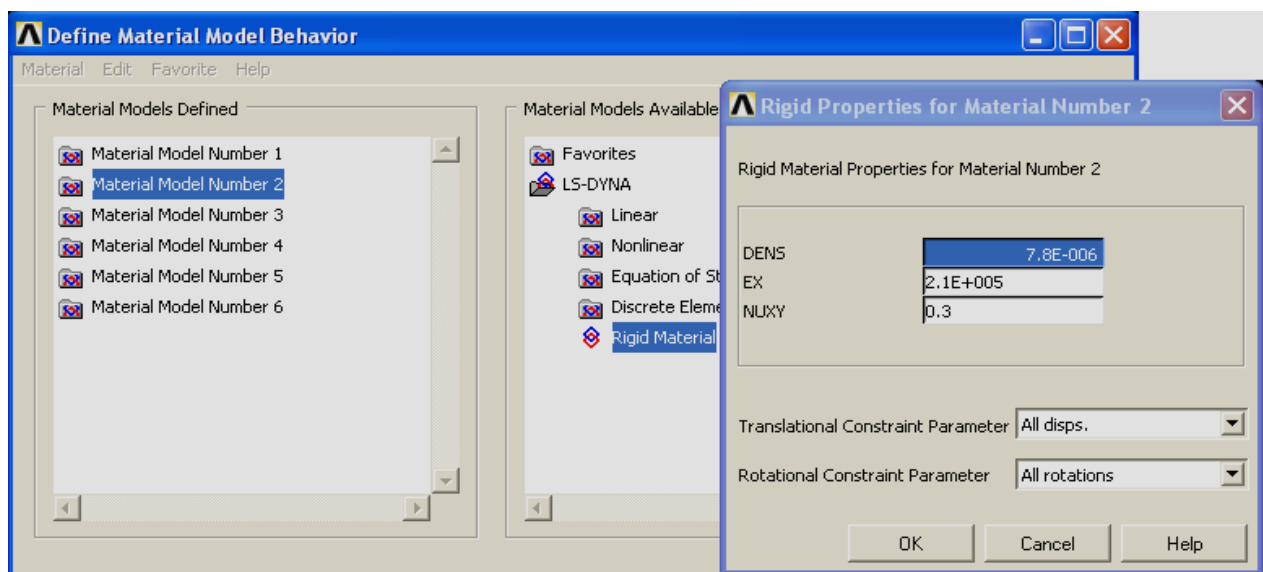



Figura 4-26 Rigid Material para las herramientas

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 84
--	--------------------------------------	--------------------------------

- **Restricciones:** Para el correcto funcionamiento de los cuerpos rígidos dentro de la simulación, se van a imponer una serie de restricciones en cuanto a los desplazamientos y posibles rotaciones, resumidas en tablas en el apartado 5.3.2 del capítulo de resultados. Se explicará en este mismo apartado, la secuencia de movimiento de los componentes, de forma que quede más claro el porqué de las restricciones impuestas. En cuanto a la placa, sus grados de libertad están restringidos por los troqueles, tanto por su movimiento como por las fuerzas que aplican sobre ella.

vi) Mallar: asignar las propiedades y mallar las áreas

- **Asignación de propiedades (Mesh Attributes):** Hay que asignar las propiedades (Tipo de Elemento, Real Constant y Material) a cada uno de los objetos que constituyen el conjunto. Para ello hay que realizar la siguiente secuencia con cada uno de ellos:
 - ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Areas

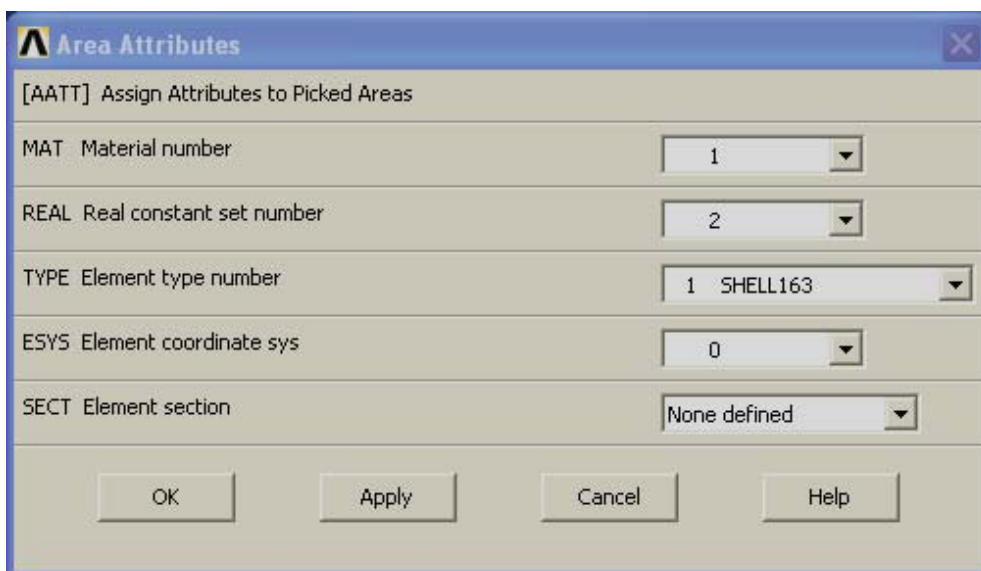


Figura 4-27 Asignación de propiedades (Mesh Attributes)

La ventana de la Figura 4-27 refleja la asignación de atributos para la placa. Habría que hacer lo mismo con el resto.

Mallado de las áreas: A continuación hay que realizar el mallado de las áreas del Conjunto_Etapa_0. La geometría de las herramientas de este paso no es muy complicada así que se puede mallar automáticamente, dejando que ANSYS elija por defecto el tamaño de la malla. El mallado de la placa se va a realizar manualmente, debido a que hay determinadas zonas que van a sufrir una deformación muy grande, motivo por el que van a necesitar un mallado de mayor densidad. Para ello, hay que dividir la placa en áreas que coincidan aproximadamente con las zonas de máxima deformación. Éstas serán malladas con un tamaño menor que el resto teniendo en cuenta que debe haber continuidad de mallado en la zona de transición entre las áreas.

De esta forma se puede no sólo controlar las zonas de máxima deformación si no también evitar hacer un mallado global de la placa muy denso, ralentizando enormemente la resolución del proceso. En el apartado 4.2.1 Modelizado 3D de la geometría se puede ver cómo se ha dividido la placa. Como se dispone de un modelo real de la placa embutida se puede hacer una división bastante precisa.

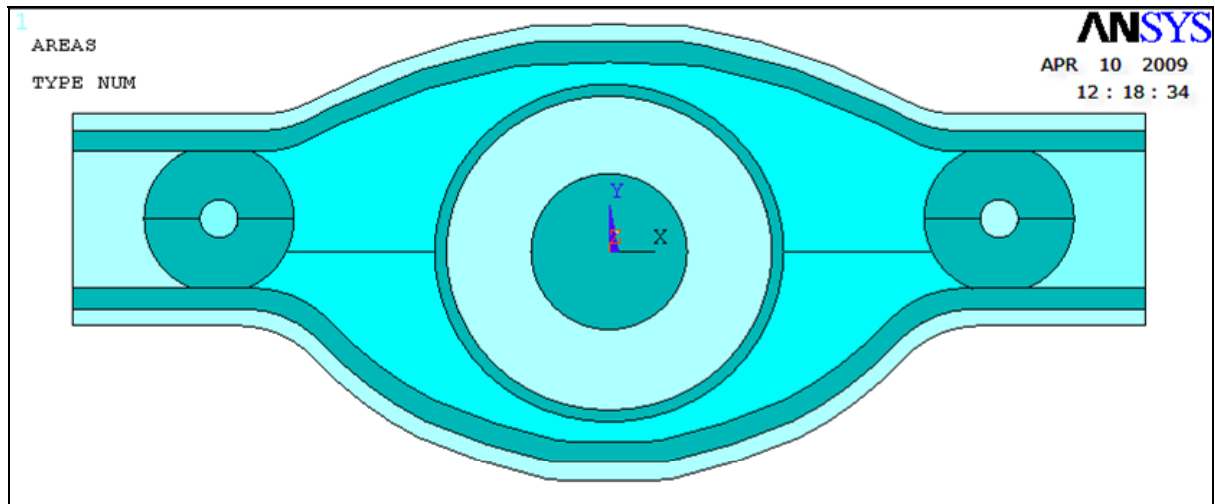





Figura 4-28 Placa dividida por zonas para mallado de distinta densidad

-  Zonas con un mallado más grueso debido a que prácticamente no se van a deformar durante todo el proceso de embutición.
-  Zonas con un mallado más fino que el anterior porque en la Etapa_2 sufren una deformación considerable, que tras ciertas pruebas con mallados más gruesos, han dado como resultado la rotura de parte de esas zonas.
-  Zonas con el mallado más fino de la placa porque en la Etapa_1, la zona central sufre una deformación muy profunda (de 18 mm de profundidad de embutición) razón por la que es necesaria la embutición previa de la Etapa_0 y en la Etapa_2, parte de las zonas circulares de los laterales y las bandas longitudinales, se ven sometidas, también, a esfuerzos de gran intensidad.

Mallado de las herramientas:

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Tool > Picked Areas
- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Tool > Mesh

Mallado de la Placa:

Para hacer un mallado de densidad variable en la placa, hay que elegir las áreas que van a tener el mismo tamaño de malla y con la opción de Control de tamaño ("Size Controls") determinarlo. Se asigna el mallado con la herramienta "Mesh Tool" tal y como se ha hecho con las áreas anteriores.

Tamaño del mallado:

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Controls > Manual Size > Areas > Picked Areas

Mallado de las áreas:

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Tool > Picked Areas

Según se van mallando las áreas que tienen propiedades comunes (por ejemplo, áreas que forman el punzón), el programa los va convirtiendo en "elementos". A partir de los cuales se podrán crear los Componentes y las Partes.

vii) Crear los componentes

A continuación hay que crear los componentes a partir de los elementos. Se eligen los nodos asociados a las áreas, por ejemplo del punzón, y se crea un componente con una etiqueta con un nombre que lo identifique. Hay que realizar los pasos en este orden:

- ANSYS Utility Menu > Select Entities > Areas by attributes > Material Number
- ANSYS Utility Menu > Select Entities > Nodes attached to Areas (Reselect)
- ANSYS Utility Menu > Select > Comp/Assembly > Create Component

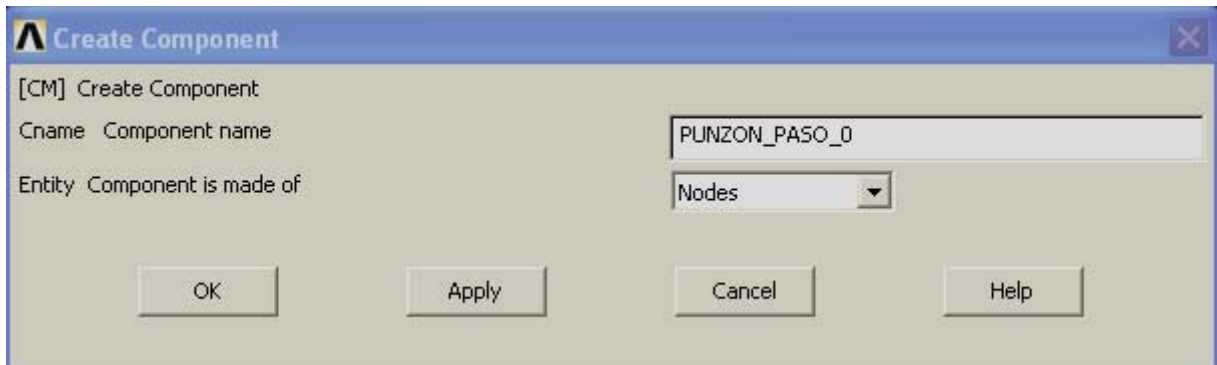


Figura 4-29 Creación de un Componente a partir de Nodos

Es importante destacar el hecho de que los componentes están creados a partir de nodos y no de elementos, áreas, volúmenes, puntos.... Una vez que se han asignado las propiedades, mallado los elementos y creado los componentes sólo queda crear las Partes y sobre éstas definir los contactos y aplicar las cargas.

viii) Crear las Partes

Las Partes se pueden definir aleatoriamente, o bien asignando manualmente un número de Parte determinado a cada componente. Las diferencias son importantes:

	Creación Individual	Creación Automática
Comando	- EDPART, Add Part	- EDPART, Create all Parts
Numeración	- Manual	- Automática y aleatoria
Actualización después de un "Full Restart"	- Mantienen la numeración inicial	- Modifican su numeración aleatoriamente
Permite borrar Parts	- Sí	- No

Figura 4-30 Diferencias en el método de creación de las Parts (individual y automático)

El método más sencillo para crear las Partes es el siguiente:

- Placa: Manualmente, porque es necesario que la Placa mantenga siempre el mismo "Part ID". Es el único componente del sistema cuyo estado al principio de la Etapa_{i+1} tiene que ser igual que al final de la Etapa_i.
 - ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > PART Options > Add Part

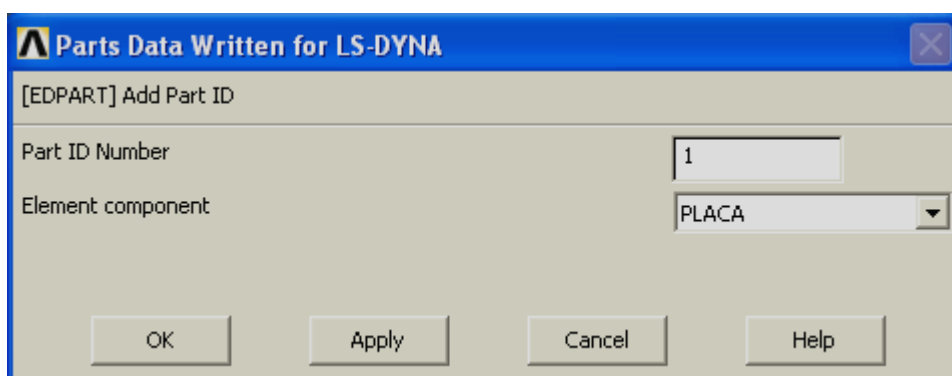


Figura 4-31 Creación de la Part 1 (Placa)

- Herramientas: Automáticamente, debido a que los contactos se establecen siempre entre cualquier herramienta y la Placa (2→1, 3→1, 4→1, 5→1, 6→1) luego, en principio, no importa si cambia el orden de su numeración en posteriores etapas (los contactos no se alteran).

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > PART Options > Create all Parts

Finalmente las Partes (“Parts”) quedan definidas de la siguiente forma:

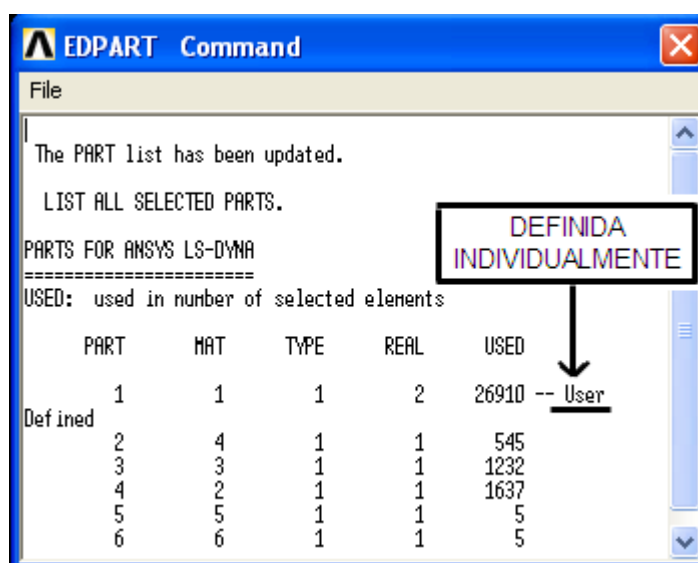


Figura 4-32 Creación combinada de “Parts”

Lo que sucede en el caso de la embutición de la Placa es que, surgieron ciertos problemas en los movimientos de las Partes una vez que se había actualizado el estado de las mismas, después del “Full Restart” (“Full Restart”), como: desplazamientos de componentes que debían permanecer quietos o actuaciones de componentes muy similares a las de la Etapa_0, pero que no era lo que se había definido en la etapa actual. Se decidió, entonces, crear todas ellas individualmente en el Estado_0 para poder borrar las que fueran necesarias en el Estado_1 (sólo las herramientas, la placa debe permanecer invariable). De esta forma se puede elegir, creando con este método las Partes en el Estado_1, el número asignado.

En vista del buen funcionamiento de las Partes, una vez borradas las anteriores y creadas las nuevas, se decidió utilizar este método en el resto de etapas a partir de la cero. Finalmente el método empleado para todas las Partes es la creación individual:

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > PART Options > Add Part

ix) Determinar los Contactos

Los contactos en todas las etapas se van a establecer entre las herramientas (punzón, pisa/s, matriz) y la Placa. Una vez que se han definido, tal y como se ha comentado en la descripción del “Full Restart” (apartado 4.1.2.2) sólo se pueden definir **los contactos** en la primera etapa, debido a que **después del “Full Restart” no se pueden modificar**.

Se recuerda que también en la Etapa_0 se va a elegir, de entre todos los contactos posibles, el Contacto Automático Superficie a Superficie (ASTS).

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Contact > Define Contact > ASTS

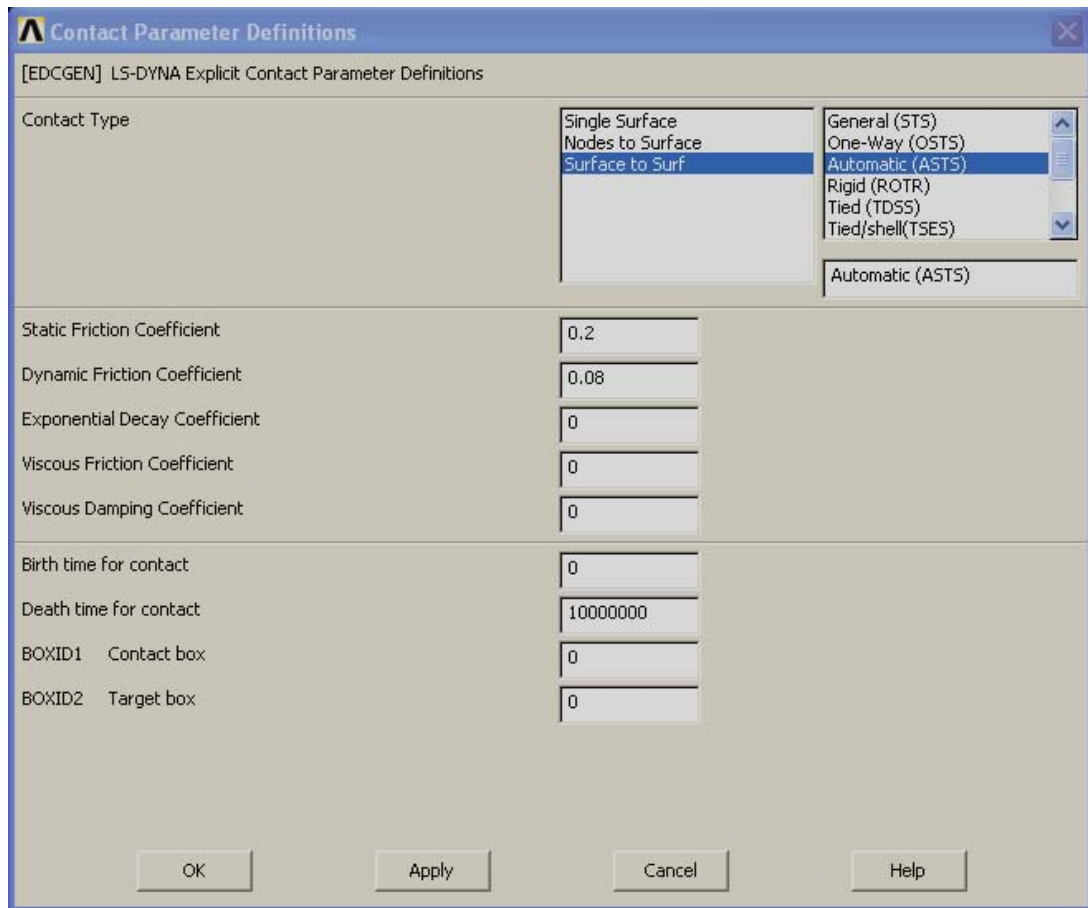


Figura 4-33 Definición de los Contactos

Como se puede ver en la figura anterior, se han introducido los coeficientes de fricción estática y dinámica entre las Partes que entrarán en contacto (ver apartado 4.1.2.1).

Tal y como se ha comentado al comienzo del apartado, se van a describir las opciones del programa que se van a emplear siguiendo el orden establecido en la Figura 4-1, sólo que incluyendo en el apartado 4.1.2.2 Solución, la descripción del “Full Restart” empleado en una

simulación doble explícita. De esta forma se pueden explicar todas estas opciones juntas pero siguiendo un orden.

x) Asignar las cargas

Antes de asignar las cargas, hay que crear los vectores en el Menú de ASNYS. Los vectores tendrán tantas entradas como precisión se necesite a la hora de desplazar los componentes. El programa interpolará entre los datos que falten para crear una función a lo largo del vector tiempo definido. Como se muestra en la Figura 4-34.

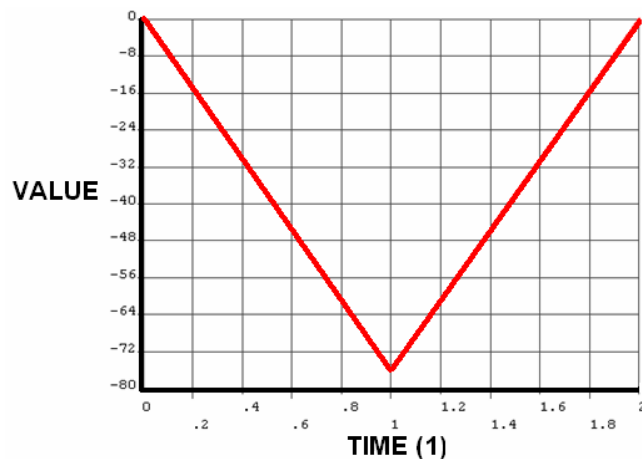


Figura 4-34 Representación del vector desplazamiento del punzón frente al tiempo

■ Creación de los vectores:

- ANSYS Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit > Add
 - Rellenar la etiqueta con el nombre.
 - Seleccionar el número de entradas del vector.

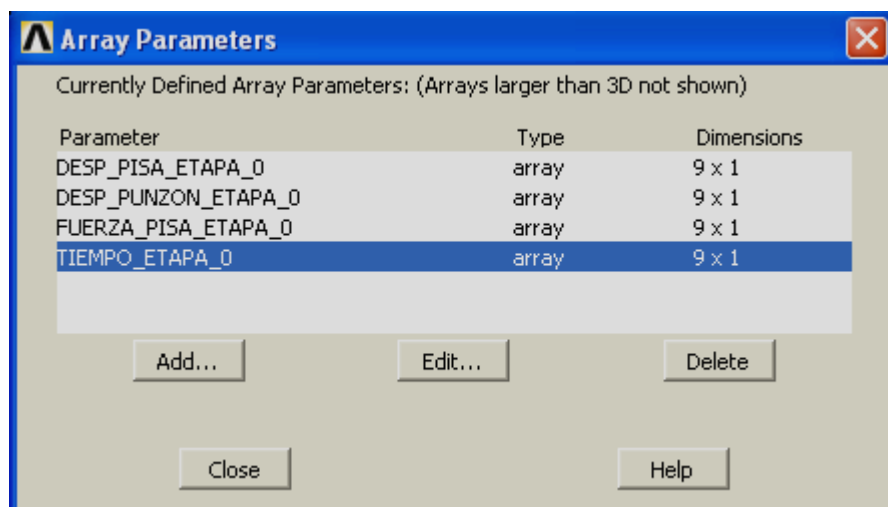


Figura 4-35 Definición de los Vectores

▪ Introducción de las coordenadas:

- ANSYS Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Edit

A continuación hay que introducir las entradas de cada uno de los vectores, se selecciona el vector correspondiente, se introducen los datos y con File > Apply/Quit en la propia ventana ya queda grabado el vector.

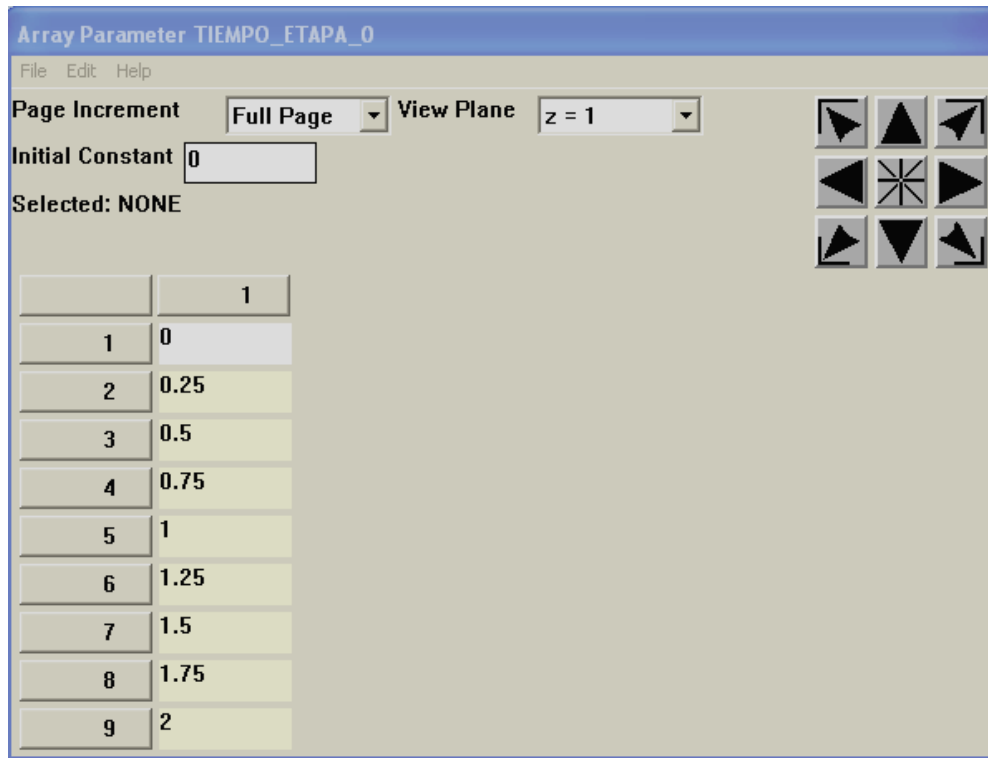


Figura 4-36 Definición de las entradas del vector Tiempo_Etapa_0

▪ Asignación de las Cargas:

Es importante recordar que las cargas sólo se pueden aplicar sobre las Partes, no sobre los Componentes, porque en este caso se aplican sobre cuerpos rígidos.

Hay que aplicar dos tipos de cargas: Desplazamiento (RBUZ) y fuerza (RBFZ), en la dirección del eje Z, ya que es la del movimiento de los componentes del Conjunto y por lo tanto la de embutición. En el siguiente Capítulo se explicará la secuencia de movimientos en cada etapa de forma que pueda entenderse mejor por qué se ha definido así cada vector.

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Specify Loads > Add Loads

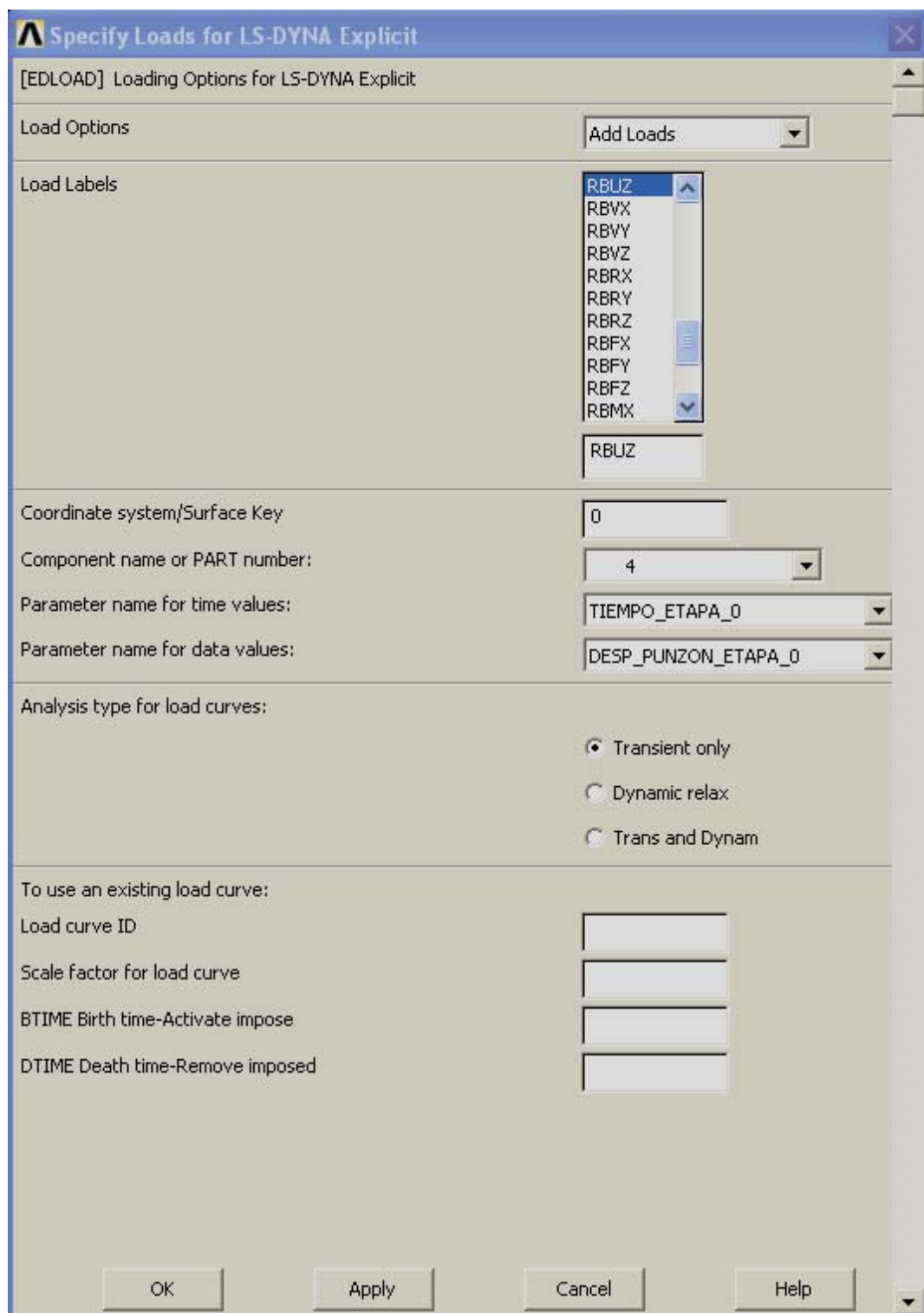



Figura 4-37 Aplicación de las Cargas

Antes de resolver la simulación será necesario comprobar que está todo bien definido: propiedades de los materiales, asignación correcta de las mismas a los Componentes, vectores

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 92
--	--------------------------------------	--------------------------------

correctamente definidos y asignados, para evitar encontrar fallos de programación de la simulación cuando, como en este caso, tardan mucho en resolverse.

xi) Opciones de análisis

En un principio no es necesario realizar ningún tipo de reiniciación en la primera etapa de la simulación, se pasa directamente al punto xii) Controles de salida de datos y tiempo de resolución de la simulación. Sin embargo, lo que ocurre en este caso, es que durante el proceso de desarrollo de las simulaciones, se ve la necesidad de realizar un mallado más fino en ciertas zonas de la Placa (Figura 4-28). Esto incrementa su número de nodos una vez mallada.

Una vez que se intenta poner en marcha la simulación, aparece un mensaje de error en la pantalla de ANSYS: “Please check the message File” y en el archivo de mensaje “Words of memory Short”.

El manual de ANSYS LS-DYNA, sugiere que se incremente la memoria del simulador con el EDSTART de nivel 0 (“New Analysis”):

- ANSYS Main Menu > Solution > Analysis Controls > New Analysis → OK

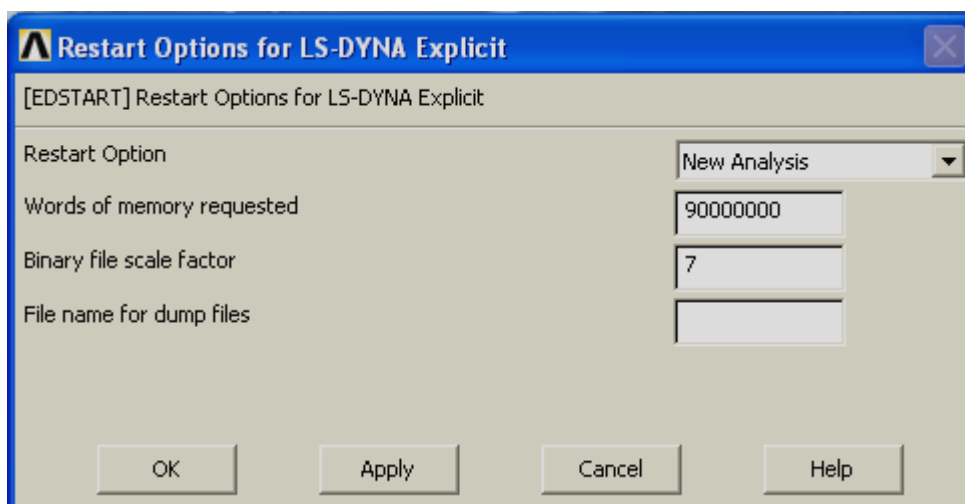


Figura 4-38 New Análisis (comando EDSTART)

Se incrementa el valor de las “Words of memory requested” hasta el valor que aparece en la Figura 4-38, suficiente para poner en marcha la simulación.

xii) Controles de salida de datos y tiempo de resolución de la simulación


Control de Salida de datos (Output Controls):

- ANSYS Main Menu > Solution > Output Controls > File Output Frequency > Number of Steps

Se puede cambiar la frecuencia de generación los archivos “dump” y de los archivos de resultados. Se pueden dejar los valores por defecto o modificarlos. En este caso se va a reducir la frecuencia de generación de datos de salida para tener más información del desarrollo de la simulación.

Tiempo de resolución de la simulación: Se introduce el tiempo final de la simulación.

- ANSYS Main Menu > Solution > Time Controls > Solution Time

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 93
--	--------------------------------------	--------------------------------

Para ver los resultados gráficos correctamente hay que elegir la escala real porque si no el programa determinará una por defecto que puede no ser la más realista. Se debe modificar la opción que viene seleccionada por defecto:

- ANSYS Utility Menu > Plot Controls > Style > Displacement Scaling > True Scale

Ahora hay que grabar en un archivo .db toda la información introducida y referente a la Etapa_0 para poder cargarla rápidamente en el siguiente análisis.

xiii) **Resolver la Etapa 0 (SOLVE)**

Una vez que se han definido todos los parámetros de la etapa, sólo queda resolverla:

- ANSYS Main Menu > Solution > Solve

xiv) **Resultados**

Una vez que se ha resuelto la simulación, se pueden visualizar los datos de salida de distintas formas: listas de resultados, visualizaciones de la simulación completa, deformada de la placa en cualquier momento de la embutición, solución nodal de Von Mises...

▪ Introducción de los resultados

- ANSYS Main Menu > General Postprocessor > Read Results > Etapa_0.rst > Last Set

Se escoge "last set" para ver el estado de la placa en el último instante de tiempo que el programa tiene registrado. Pero como se ha comentado se puede escoger cualquier instante de tiempo para conocer el estado tensional de la placa en un momento determinado.

▪ Visualización de los resultados

▪ Gráficamente:

Visualización de la simulación completa:

- ANSYS Utility Menu > Plot Controls > Animate > Over Results/ Over Time

Placa deformada después de la Embutición:

- ANSYS Utility Menu > Plot Controls > Nodal Solution > Deformed Shape


▪ Analíticamente:

Desplazamiento de los nodos después de la deformación

- ANSYS Utility Menu > List > Results > Nodal Solution > DOF Solution
- ANSYS Utility Menu > List > Results > Nodal Solution > stress > Von Mises stress

4.2.3.2. Segunda embutición: Etapa_1

Una vez que ha finalizado la Etapa_0, correspondiente a la primera embutición, la placa está deformada, con la forma esperada resultado de la embutición del Conjunto_Etapa_0. En el apartado de resultados se especificará el criterio seguido para aceptar o rechazar los resultados analíticos obtenidos comparando con la placa real embutida. Se podrán ver, también, los resultados gráficos como la placa deformada e imágenes de los pasos en distintos momentos de la embutición.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 94
--	--------------------------------------	--------------------------------

i) Cargar archivo Etapa 0

Lo primero que hay que hacer es cargar el estado anterior al que se quiere definir, en este caso se quiere simular la Etapa_1, luego se abre el archivo “Etapa_0.db” que previamente se ha generado (contiene toda la información introducida en el análisis exceptuando los resultados). A continuación, se carga el archivo de resultados “Etapa_0.rst”, suponiendo que previamente éstos se han revisado y se han dado por válidos.

- ANSYS Utility Menu > Open ANSYS File > Etapa_0.db

ii) Introducir archivo Etapa 0

A continuación hay que cargar el archivo de resultados.

- ANSYS Main Menu > General Postprocessor > Data & File Options > Etapa_0.rst

iii) “Full Restart”

Una vez que se han cargado el análisis anterior y sus resultados, hay que el segundo análisis a través del Reinicio Total (“Restart” de nivel 3), introduciendo el último archivo “dump” creado en la Etapa_0. En este caso es el “d3dump 17”, el que contiene la información del último estado de tensiones y deformaciones del sistema.

- Main Menu > Solution > Analysis Options > Restart Options > Full Restart

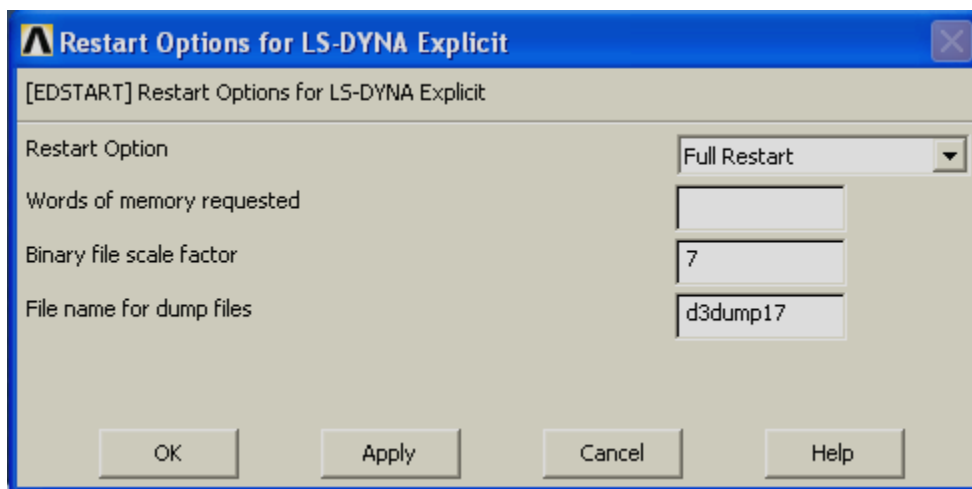



Figura 4-39 “Full Restart” en la Etapa_1

Una vez que se pulsa la tecla de “OK” el análisis pasa a llamarse Etapa_1 y los archivos mencionados anteriormente, durante la explicación del “Full Restart” también cambian su numeración de 00 → 01.

iv) Borrar la geometría de la Etapa 0

Ahora hay que borrar la geometría de la Etapa_0 (Punzón, Pisa y Matriz), para ello hay que seguir un orden determinado:

1. Seleccionar los elementos que se quieren borrar.
2. Borrar el mallado.
 - ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Clear > Areas

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 95
--	--------------------------------------	--------------------------------

3. Borrar las áreas, líneas y puntos.

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Area and Below

Por supuesto, se mantiene intacta la chapa, que es la que tiene que pasar a la Etapa_1 tal y como está en el último estado de la Etapa_0.

v) Importar la geometría de la Etapa 1

De la misma forma que en la etapa anterior:

- ANSYS Utility Menu > File > Import > IGES > Conjunto_Etapa_1.igs

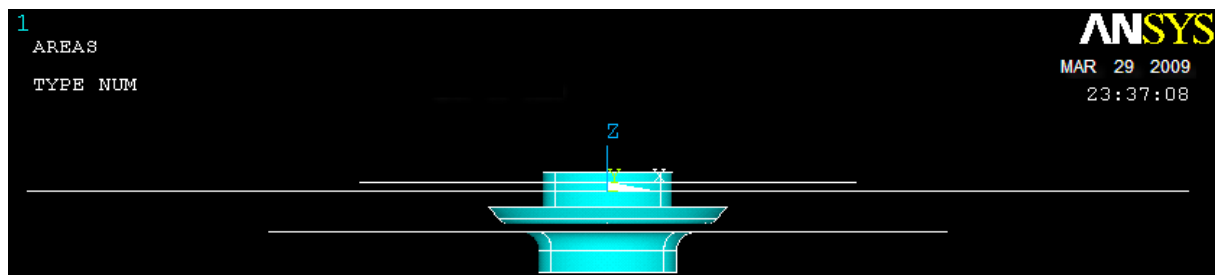


Figura 4-40 Conjunto_Etapa_1 (montaje final)

vi) Borrar las “Parts” de la Etapa 0

Como se ha comentado, se van a borrar las Parts correspondientes a las herramientas de la Etapa_0.

- ANSYS Main Menu > LS-DYNA Options > Parts Options > Delete Part

vii) Crear materiales Etapa 1


Como se ha explicado en la descripción del “Full Restart” es necesario, crear nuevos materiales correspondientes a los cinco objetos importados para poder asignarles un número de Part distinto a cada uno:

- Material 7: Punzón (Rigid Material).
- Material 8: Pisa_Punzón (Rigid Material).
- Material 9: Pisa_Extra (Rigid Material).
- Material 10: Matriz (Rigid Material).
- Material 11: Pisa_Matriz (Rigid Material).

Las restricciones impuestas en los materiales, cambian con respecto al estado anterior. En esta nueva etapa hay un Pisa_Extra que va a tener restringidos todos sus grados de libertad ver secuencia de movimientos en el apartado 5.3.2 del Capítulo de Resultados.

Se crean de la misma forma que en la etapa anterior. Por simplicidad y para evitar posibles confusiones a la hora de elegir los materiales, se borran los materiales 2, 3, 4 y 5 pertenecientes a las herramientas de la Etapa_0 (se borran desde el menú de la ventana de “Material Models”).

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models > New Model > LS-DYNA > Rigid Material

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 96
--	--------------------------------------	--------------------------------

viii) Mallar: asignar las propiedades y mallar las áreas

Tal y como se realizó en la etapa anterior, primero hay que asignar las propiedades (Mesh Attributes) y después mallar las áreas (Mesh Tool).

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Areas
- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Tool > Mesh

En este caso sólo hay que mallar las nuevas herramientas introducidas. Se va a dejar que ANSYS escoja el tamaño de mallado por defecto ya que la geometría no es muy complicada y no es necesario su mallado manual.

ix) Componentes

Una vez mallados los elementos, se crean los componentes de la Etapa_1:

- ANSYS Utility Menu > Select Entities > Areas by attributes > Material Number
- ANSYS Utility Menu > Select Entities > Nodes attached to Areas (Reselect)
- ANSYS Utility Menu > Select > Comp/Assembly > Create Component

x) Partes

A continuación hay que crear las Partes” correspondientes a los nuevos elementos introducidos con la misma numeración, ya que no se pueden modificar los contactos. Luego se tendrán nuevas Partes 2, 3, 4, 5 y 6.

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Part Options > Add Part

Sigue siendo necesario, después de crear las Partes actualizarlas con el comando UPDATE, de forma que el programa actualice el conjunto al estado actual, debido a que la Parte de la Placa ha permanecido sin alterarse de un Estado a otro.

Primero hay que asegurarse de que se han seleccionado todas las Partes creadas:

- ANSYS Utility Menu > Select Everything


A continuación se actualizan las Partes:

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Part Options > Update Parts

xi) Inicializar el estado tensional de la Etapa 0

Ahora hay que activar el estado tensional correspondiente a la Etapa_0, para la placa (PART 1), con el comando EDIS (explicado en el apartado 4.1.2.2):

- ANSYS Main Menu > Solution > Analysis Options > Initial Stress > Add [Part1]

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 4</p> <p>Página: 97</p>
--	---	---------------------------------------

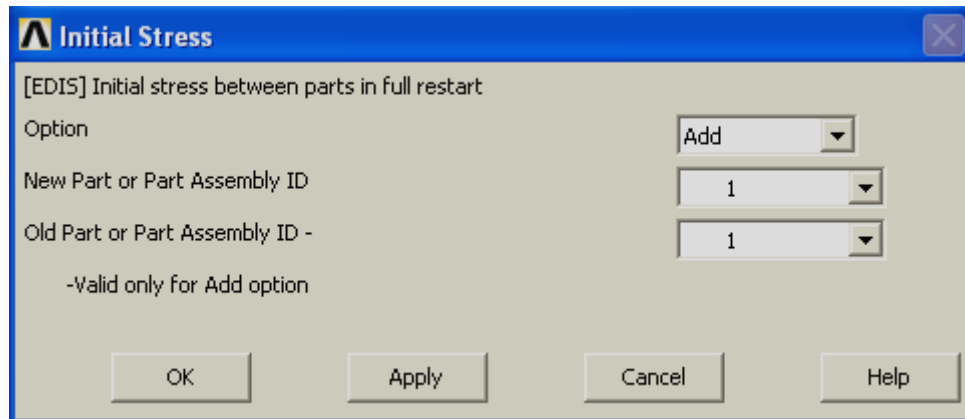


Figura 4-41 Comando EDIS

De entre las tres opciones que ofrece este comando:

- Add: Define la tensión inicial de la Part/s elegidas entre el análisis anterior y el nuevo.
- Dele: Borra la tensión inicial de la Part/s elegidas entre el análisis anterior y el nuevo.
- List: Muestra una lista con la iniciación entre las Partes.

Se escoge la primera ya que lo que se quiere hacer es mantener el estado de deformación y tensión del Estado_0 en el Estado_1.

Se introduce 1 en “New Part” y “Old Part” porque la placa como se puede ver en las tablas del capítulo de resultados y como se ha comentado, tiene durante todo el análisis el mismo Número de Parte (PART ID).

xii) Borrar las cargas de la Etapa 0

Es necesario borrar las cargas aplicadas sobre las Partes en la Etapa_0, para poder definir a continuación las nuevas cargas que se van a emplear en la Etapa_1 y aplicarlas.

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Delete Loads > Delete All (se eliminan todas las cargas aplicadas a la vez)

Ahora, se pueden borrar también los vectores definidos. De esta forma, se evita seleccionar un vector del Estado anterior en el nuevo:

- ANSYS Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit → Delete

xiii) Definir y aplicar las cargas de la Etapa 1


Se definen las cargas (vectores) correspondientes a la Etapa_1 de la misma forma que en la etapa anterior.

- ANSYS Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Edit

Se aplican las cargas que se acaban de definir sobre las Partes adecuadas (ver tanto la secuencia de movimientos como los vectores definidos).

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Specify Loads > Add Loads

Una vez que se han aplicado las cargas en el sistema, éste queda completamente definido, quedando tan solo determinar el tiempo final de la simulación. Hay que tener en cuenta al

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 98
--	--------------------------------------	--------------------------------

definir el vector temporal de carga que tiene que comenzar a partir del tiempo final de la etapa anterior.

xiv) Controles de salida de datos y tiempo de resolución de la simulación

- Control de salida de datos: No se va a modificar nada con respecto a la Etapa_0.
- Tiempo de resolución de la simulación: Hay que introducir el tiempo correspondiente al final de la Etapa_1.
 - ANSYS Main Menu > Solution > Time Controls > Solution Time

Ahora hay que grabar en un archivo .db toda la información introducida y referente a la Etapa_1 para poder cargarla rápidamente en el siguiente análisis.

xv) Resolver la Etapa 1 (SOLVE)

Una vez que se han definido todos los parámetros de la etapa, sólo queda resolverla:

- ANSYS Main Menu > Solution > Solve

xvi) Resultados

Al igual que en la etapa anterior, lo primero que hay que hacer es introducir el archivo de resultados, leerlo y después con cualquiera de las opciones descritas obtener tanto resultados analíticos como gráficos.

4.2.3.3. Tercera Embutición: Etapa_2

La definición de la simulación de la Etapa_2 es igual que la de la Etapa_1, considerando las propiedades de los materiales, restricciones y cargas correspondientes a este paso de la embutición. Por lo tanto, se van a presentar de una forma muy resumida los pasos de esta etapa:

Una vez que ha finalizado la Etapa_1, correspondiente a la segunda embutición, la placa está deformada, con la forma esperada resultado de la embutición del Conjunto_Etapa_1.

En el apartado de resultados se especificará el criterio seguido para aceptar o rechazar los resultados analíticos obtenidos comparando con la placa real embutida. Se podrán ver, también, los resultados gráficos como la placa deformada e imágenes de los pasos en distintos momentos de la embutición.

i) Cargar archivo Etapa 1

- ANSYS Utility Menu > Open ANSYS File > Etapa_1.db

ii) Introducir archivo Etapa 1

A continuación hay que cargar el archivo de resultados.

- ANSYS Main Menu > General Postprocessor > Data & File Options > Etapa_1.rst

iii) “Full Restart”

Una vez que se han cargado el análisis anterior y sus resultados, hay que inicializar el tercer análisis a través del “Full Restart”, introduciendo el último archivo “dump” creado en la Etapa_1. En este caso es el “d3dump 29”, el que contiene la información del último estado tensional-deformacional del sistema

- Main Menu > Solution > Analysis Options > Restart Options > Full Restart

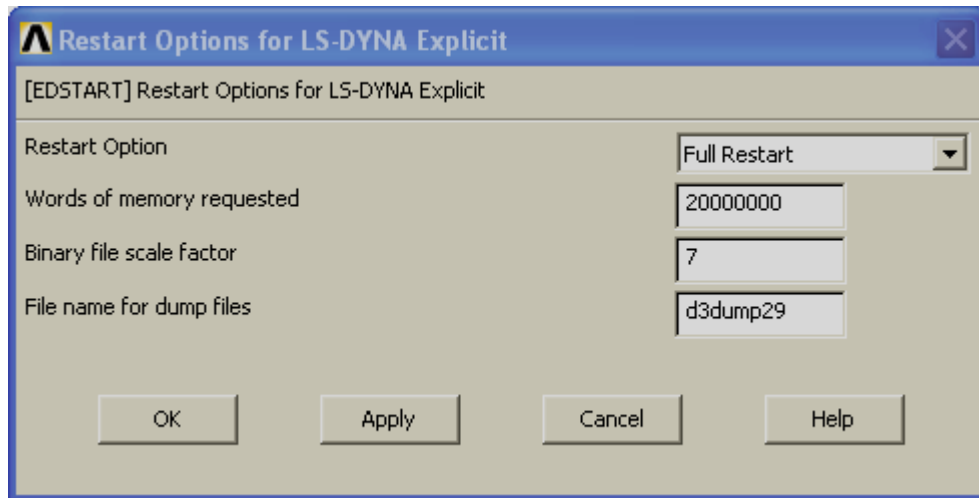


Figura 4-42 “Full Restart” Etapa_2

Es necesario ampliar la memoria disponible por defecto en el análisis para poder comenzar a resolver la simulación, después de revisar el archivo “message file” y ver que la memoria disponible según el programa no era suficiente.

Una vez que se pulsa la tecla de “OK” el análisis pasa a llamarse Etapa_2 y los archivos mencionados anteriormente, durante la explicación del “Full Restart” también cambian su numeración de 01 → 02.

iv) Borrar la geometría de la Etapa 1

Ahora hay que borrar la geometría de la Etapa_1 (Punzón, Pisa_Punzón, Pisa_Extra, Pisa_Matriz y Matriz) siguiendo el orden establecido en la explicación de la etapa anterior:

Por supuesto, se mantiene intacta la chapa, que debe pasar a la Etapa_2 tal y como está en el último estado de la Etapa_1.

v) Importar la geometría de la Etapa 2

- ANSYS Utility Menu > File > Import > IGES > Conjunto_Etapa_2.igs

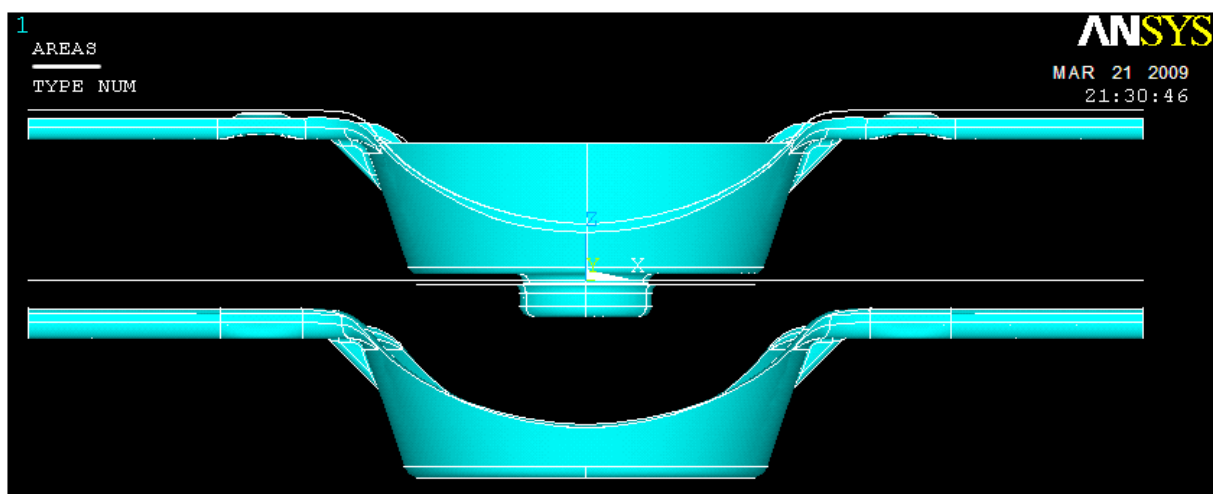



Figura 4-43 Conjunto_Etapa_2 (montaje final)

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 4</p> <p>Página: 100</p>
--	---	--

vi) **Borrar las Parts de la Etapa 1**

A continuación se procede a borrar las Partes:

- ANSYS Main Menu > LS-DYNA Options > Parts Options > Delete Part

vii) **Crear materiales Etapa 2**

Como en las etapas previas, los materiales se crean para las herramientas introducidas:

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models > New Model > LS-DYNA > Rigid Material

Lista de materiales creados:

- Material 12: Punzón (Rigid Material).
- Material 13: Matriz (Rigid Material).
- Material 14: Pisa_Matriz (Rigid Material).
- Material 15: Área_1 superior (Rigid Material).
- Material 16: Área_2 inferior (Rigid Material).

Después de crear los materiales de la Etapa_2 se borran los de la Etapa_1.

Las restricciones impuestas en los materiales, cambian con respecto al estado anterior. En esta nueva etapa es necesario incluir el Área 1 en el conjunto.

viii) **Mallar: asignar las propiedades y mallar las áreas**

Siguiendo los pasos de las anteriores etapas:

Asignar propiedades

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Areas

Mallar las áreas

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Tool > Mesh

Hay que mallar las nuevas herramientas introducidas, teniendo en cuenta que tras ciertos problemas con el mallado debido tanto a las formas irregulares como al tamaño, en ocasiones, muy pequeño de ciertas áreas que constituyen el punzón y la matriz. Se ha tenido que elegir un tamaño de área de mallado muy pequeño, prácticamente como el de la placa. Esto se traduce en mayor tiempo de resolución de la etapa.

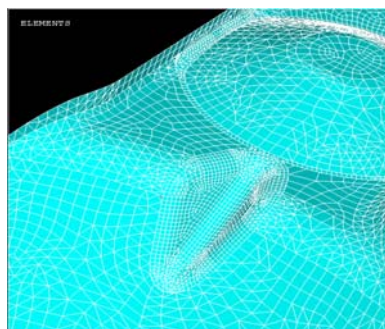
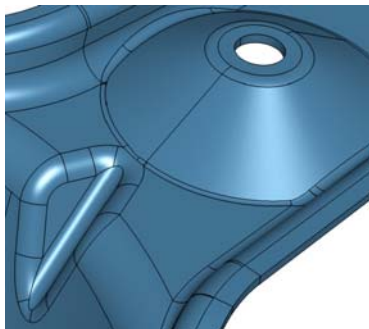



Figura 4-44 Tamaño del mallado restringido por la geometría

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 101
--	--------------------------------------	---------------------------------

ix) Componentes

Una vez mallados los elementos, se crean los componentes de la Etapa_2:

- ANSYS Utility Menu > Select Entities > Areas by attributes > Material Number
- ANSYS Utility Menu > Select Entities > Nodes attached to Areas (Reselect)
- ANSYS Utility Menu > Select > Comp/Assembly > Create Component

x) Partes

Se crean de nuevo las Partes 2, 3, 4, 5 y 6.

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Part Options > Add Part

Se actualizan las Partes:

- ANSYS Utility Menu > Select Everything
- ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Part Options > Update Parts

xi) Inicializar el estado tensional de la Etapa 1

Ahora hay que activar el estado tensional correspondiente a la Etapa_1, para la placa (PART 1), con el comando EDIS:

- ANSYS Main Menu > Solution > Analysis Options > Initial Stress → Add [Part1]

xii) Borrar las cargas de la Etapa 1

Se borran las cargas y los vectores de la etapa anterior:

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Delete Loads > Delete All
- ANSYS Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit → Delete

xiii) Definir y aplicar las cargas de la Etapa 1

Definición de las cargas:

- ANSYS Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Edit


Se aplican las cargas que se acaban de definir sobre las Partes adecuadas (ver tanto la secuencia de movimientos como los vectores definidos).

- ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Specify Loads > Add Loads

Una vez que se han aplicado las cargas en el sistema, éste queda completamente definido, quedando tan solo determinar el tiempo final de la simulación. Hay que tener en cuenta al definir el vector temporal de carga que tiene que comenzar a partir del tiempo final de la etapa anterior.

xiv) Controles de salida de datos y tiempo de resolución de la simulación

- Control de salida de datos: No se va a modificar nada con respecto a la Etapa_1.
- Tiempo de resolución de la simulación: Hay que introducir el tiempo correspondiente al final de la Etapa_2.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 4 Página: 102
--	--------------------------------------	---------------------------------

- ANSYS Main Menu > Solution > Time Controls > Solution Time

Ahora hay que grabar en un archivo .db toda la información introducida y referente a la Etapa_2 para poder cargarla rápidamente en el siguiente análisis.

xv) Resolver la Etapa 2 (SOLVE)


Una vez que se han definido todos los parámetros de la etapa, sólo queda resolverla:

- ANSYS Main Menu > Solution > Solve

xvi) Resultados

Al igual que en la etapa anterior, lo primero que hay que hacer es introducir el archivo de resultados, leerlo y después con cualquiera de las opciones descritas obtener tanto resultados analíticos como gráficos.

Llegados a este punto, se debería llevar a cabo la definición de la Etapa_3 (cuarta embutición). No se va a realizar porque, como se verá en el capítulo de resultados, ciertas partes de la placa sufren una deformación muy grande que llevan a la placa a romperse por varias zonas. Una vez que esto sucede ya no tendría sentido continuar con la última Etapa. Se explicará por qué la placa no llega a la forma final planteada sin descartar este método como posible herramienta de simulación del proceso real.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 5 Página: 103
--	--------------------------------------	---------------------------------

5. RESULTADOS

5.1. Resultados y análisis de resultados

Una vez concluida la definición de las simulaciones, se procede a la presentación de los resultados obtenidos en cada una de las etapas, describiendo previamente:

- Las hipótesis de partida del problema,
- La geometría y propiedades tanto de las herramientas como de la placa,
- Las condiciones de contorno y cargas aplicadas sobre el conjunto.

Todos ellos son aspectos que tendrán una influencia en mayor o menor medida en el análisis de los resultados.

De cada etapa de la simulación se presentarán:

- Profundidad de embutición.
- Ángulos de embutición.

Los resultados obtenidos en las simulaciones se compararán con las mediciones realizadas sobre la pieza real con una MMC (máquina de medir por coordenadas).

De esta forma, se pretende dar una validez al método estudiado teniendo siempre en cuenta los posibles errores que pueda cometer tanto el programa y el modelo empleado, como los instrumentos de medida utilizados para medir la profundidad de embutición real de la placa.

También se incluirán las tensiones producidas a lo largo de la placa debido a los esfuerzos que soporta y las zonas de máxima tensión incluyendo los valores máximos alcanzados con objeto de verificar los parámetros que definen el análisis.

5.2. Recordatorio de las hipótesis del modelo de simulación

Como se ha comentado en la metodología (Capítulo 4), las hipótesis consideradas en el proceso y que será necesario tener en cuenta en el análisis son:

- Las herramientas se modelizan como “cuerpos rígidos”. Se asume que los troqueles no sufren deformación alguna durante el proceso.
- El espesor de la placa es igual a 2mm.
- Las propiedades de partida de la chapa se consideran constantes: densidad, coeficiente de Poisson, módulo de Young, módulo tangente y el coeficiente de tensión de rotura.
- Se desprecian las posibles variaciones de temperatura en la placa durante el proceso (embutición en frío). El modelo escogido no contempla los posibles gradientes de temperatura producidos.
- La fuerza de los pisas se considera constante en todo momento.
- Se consideran los mismos coeficientes de rozamiento en todas las etapas.
- Todas las cargas aplicadas en el sistema son conocidas.

5.3. Descripción de los componentes del modelo

5.3.1. Placa

- Dimensiones de la placa inicial:

Se parte de la siguiente placa plana para realizar las simulaciones. Se conoce tanto la geometría de la misma como las propiedades del acero del que está formada.

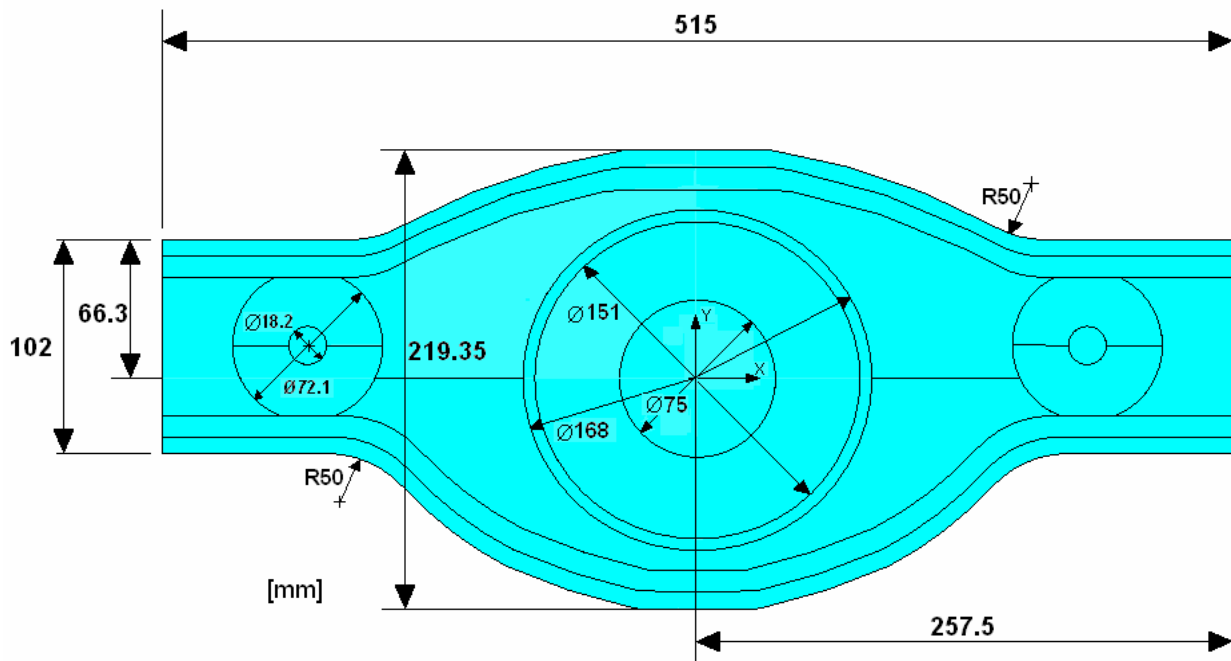


Figura 5-1 Placa de partida acotada y dividida en áreas para el mallado de densidad variable

▪ Parámetros de la placa:

Tipo de Elemento	Shell 163
Constantes Reales	R2
Número de Material	1
Material	Plastic Kinematic
Restricciones	----
Nombre de los Componentes	Placa
Nº de Parte	1
Contacto entre Superficies ⁹	ASTS

Tabla 5-1 Parámetros de la placa

- Constantes Reales: R2 = 2 mm (se recuerda que es el espesor de la placa).

- Modelos de material: Propiedades introducidas de valor constante durante todo el proceso.

⁹ Se definen en la Etapa_0 y ya no se pueden modificar en las siguientes.

- Modelo Plastic Kinematic:

PROPIEDADES	VALOR Y UNIDADES
Densidad	7800 kg/m ³
Módulo de Young (Ex)	210000 MPa
Coeficiente de Poisson (ν_{xy})	0.3
Límite de fluencia	237 MPa
Módulo tangente	763 MPa
Parámetro de endurecimiento (β)	0
Coef. de Cowper Symonds (C)	40
Coef. de Cowper Symonds (P)	5
Coeficiente de tensión de rotura	0.75

Tabla 5-2 Propiedades del modelo Plastic Kinematic para la chapa

5.3.2. Herramientas

Se explicará a continuación, en cada etapa por separado, ya que trabaja un conjunto de herramientas distinto en cada una.

5.3.2.1. Etapa_0: Primera Embutición

▪ Esquema del Conjunto Etapa_0

El Conjunto_Etapa_0, como ya se ha comentado en el Capítulo 4, está formado por: punzón, pisa, matriz y áreas 1 y 2, definidas, en esta etapa, sólo para poder mantener los contactos en las restantes.

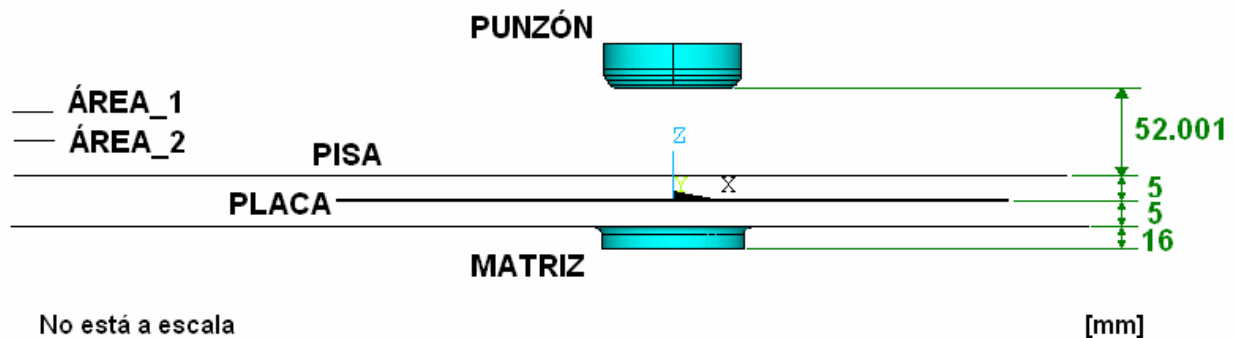



Figura 5-2 Esquema acotado del Conjunto_Etapa_0

▪ Secuencia de movimientos de las herramientas

El punzón comienza a desplazarse en dirección Z (sentido negativo) a una velocidad constante (ver vectores) a la vez que el pisa, que se encuentra más cerca de la placa, llega antes y aprisiona la chapa entre él mismo y la matriz. Mientras tanto, el punzón continúa bajando hasta llegar a la profundidad máxima que le permite la matriz (16 mm). Una vez que el punzón llega a la posición más baja ($z=-21\text{mm}$) en ($t=1\text{ seg.}$), comienza la retirada del mismo con la misma velocidad que en el avance y el pisa deja de aplicar fuerza una vez

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 5 Página: 106
--	--------------------------------------	---------------------------------

que el punzón está muy cerca de su posición inicial. En todo momento, la matriz permanece en la misma posición.

▪ Parámetros de las herramientas

	HERRAMIENTAS DEL CONJUNTO ETAPA_0				
PARÁMETROS	Punzón	Pisa	Matriz	Área 1	Área 2
Tipo de Elemento	Shell 163	Shell 163	Shell 163	Shell 163	Shell 163
Constantes Reales	R1	R1	R1	R1	R1
Número de Material	4	3	2	5	6
Modelo de Material	Rigid Material	Rigid Material	Rigid Material	Rigid Material	Rigid Material
Restricciones	- Desplazamiento en ejes X e Y - Todos los giros	- Desplazamiento en ejes X e Y - Todos los giros	- Todos los desplazamientos - Todos los giros	- Desplazamiento en ejes X e Y - Todos los giros	- Desplazamiento en ejes X e Y - Todos los giros
Nombre de los Componentes	Punzón_Etapa_0	Pisa_Etapa_0	Matriz_Etapa_0	Área1_Etapa_0	Área2_Etapa_0
Nº de Parte	4	3	2	5	6
Contacto entre Superficies	ASTS	ASTS	ASTS	ASTS	ASTS

Tabla 5-3 Parámetros de la Etapa_0

- Constantes Reales: R1 = 0,001 mm

- Modelos de material: Propiedades introducidas de valor constante durante todo el proceso.

- Modelo Rigid Material:

PROPIEDADES	VALOR Y UNIDADES
Densidad	7800 kg/m ³
Módulo de Young (Ex)	210000 MPa
Coeficiente de Poisson (Nu _{xy})	0.3

Tabla 5-4 Propiedades Rigid Material para las herramientas

- Vectores aplicados: Los vectores aplicados, definidos en la Etapa_0, son los siguientes:

Tiempo [seg]	0	0.25	0.50	0.75	1	1.25	1.50	1.75	2
Desp_punzón [mm]	0	-19	-38	-57	-76	-57	-38	-19	0
Desp_pisa [mm]	0	-5	-7.999	-7.999	-7.999	-7.999	-7.999	-5	0
Fuerza_pisa [N]	0	-90000	-90000	-90000	-90000	-90000	-90000	-90000	0

Tabla 5-5 Vectores Etapa_0

Nota: la fuerza del pisa corresponde a 10 nitros x 1000 da N x η 90% = 9000 daN [1]

Para entender de forma más clara el desplazamiento tanto del pisa como del punzón, se presenta la siguiente gráfica (ver Figura 5-3). Se puede destacar:

- Desplazamiento máximo del punzón: En $t = 1\text{seg}$ el punzón está en la posición más baja $U_z = -76\text{ mm}$
- Desplazamiento del pisa: el pisa avanza progresivamente para controlar la aplicación de la fuerza del mismo, durante el intervalo $t [0,25; 1,75]$ que permanece constante y vuelve a su posición inicial.

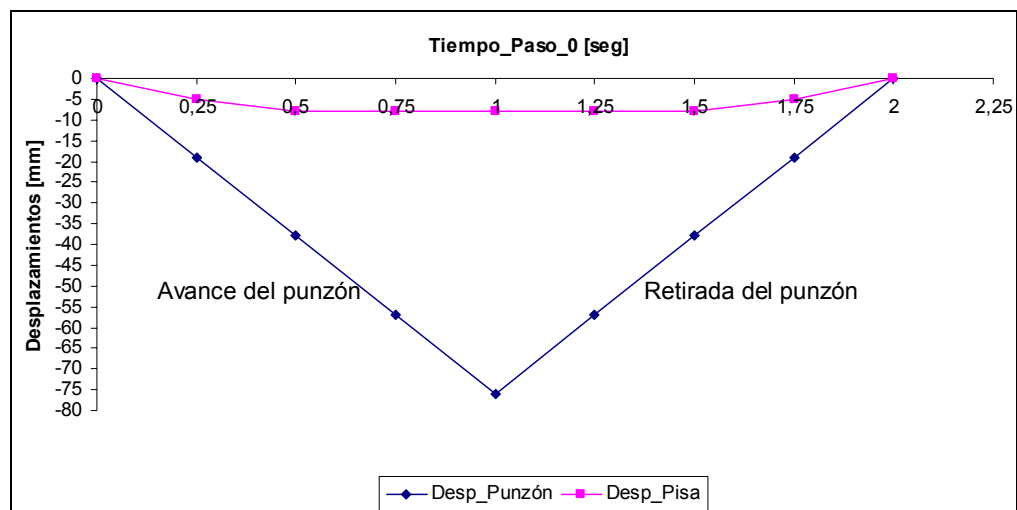


Figura 5-3 Vectores desplazamiento Etapa_0

Hay que aclarar que la fuerza del pisa crece linealmente desde cero hasta alcanzar el valor deseado, se mantiene constante durante el tiempo definido y desciende de la misma forma hasta cero.

5.3.2.2. Etapa_1: Segunda Embutición

- Esquema del Conjunto Etapa 1

Los componentes del Conjunto_Etapa_1, como se puede ver en la Figura 5-4, son: punzón, pisa_punzón, pisa_extra, matriz y pisa_matriz (sólo se incluyen las herramientas). Este es el conjunto que más elementos tiene y en el que hay que fijarse a la hora de construir el resto de los conjuntos.

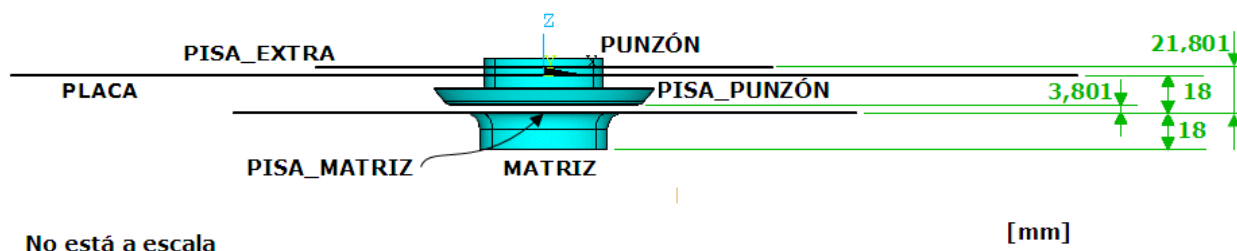


Figura 5-4 Esquema acotado del Conjunto_Etapa_1

▪ Secuencia de movimientos de las herramientas


- El pisa_matriz, se encuentra en contacto con la placa deformada en la Etapa_0, de forma que comienza desde el principio de la simulación a ejercer una fuerza constante en dirección Z y sentido positivo. Lo mismo ocurre con el pisa_punzón, que está en contacto con la placa por su superficie superior y ejerce una fuerza en dirección Z y sentido negativo desde el comienzo del análisis.
- Mientras tanto, la matriz comienza a desplazarse en dirección Z positiva. Desde ese momento, la matriz, el pisa_matriz y la placa comienzan a desplazarse a la misma velocidad hasta que la placa toca el pisa_extra.
- El pisa_punzón, continúa ejerciendo fuerza sobre la placa mientras que se ve arrastrado por el desplazamiento de estos tres elementos (matriz, pisa_matriz y placa).
- Una vez que la placa toca el pisa extra, la embutición se ha completado y comienza la retirada tanto de la matriz como de las fuerzas aplicadas por los pisas.

▪ Parámetros de las herramientas

Los componentes del Conjunto Etapa_1, mantienen los parámetros introducidos en la Etapa_0, exceptuando:

- El número del material, ya que es una exigencia del "Full Restart" (ver "opciones de análisis" de la sección 4.1.2.2).
- Las restricciones, ya que la secuencia de movimientos de los componentes del conjunto es diferente.
- El nombre de los componentes, debido a que se trata de una etapa distinta y no son los mismos que en la anterior.
- El número de Parte (PART ID), como se ha explicado en el punto (xi) de la sección 4.1.2.2). Se recuerda que sólo es necesario modificar una de estas tres propiedades: Constante Real, número de tipo de elemento o número de material para poder asignar un número de Parte distinto a cada elemento.

COMPONENTES DEL CONJUNTO ETAPA_1					
PARÁMETROS	Punzón	Pisa_Punzón	Pisa_Extra	Matriz	Pisa-Matriz
Tipo de Elemento	Shell 163	Shell 163	Shell 163	Shell 163	Shell 163
Constantes Reales	R1	R1	R1	R1	R1
Número de Material	7	8	9	10	11
Modelo de Material	Rigid Material	Rigid Material	Rigid Material	Rigid Material	Rigid Material

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 5 Página: 109
--	--------------------------------------	---------------------------------

	COMPONENTES DEL CONJUNTO ETAPA_1				
PARÁMETROS	Punzón	Pisa_Punzón	Pisa_Extra	Matriz	Pisa-Matriz
Restricciones	- Todos los desplazamientos - Todos los giros	- Desplazamiento en ejes X e Y - Todos los giros	- Todos los desplazamientos - Todos los giros	-Desplazamiento en ejes X e Y -Todos los giros	- Desplazamiento en ejes X e Y -Todos los giros
Nombre de los Componentes	Punzón_Etapa1	Pisa_Punzón_Etapa1	Pisa_Extra_Etapa1	Matriz_Etapa1	Pisa_Matriz_Etapa1
Nº de Parte	2	3	5	4	6
Contacto entre Superficies	ASTS	ASTS	ASTS	ASTS	ASTS

Tabla 5-6 Componentes del Conjunto Etapa_1

- Vectores aplicados: Los vectores aplicados, definidos en la Etapa_1, son los siguientes:

Tiempo [seg]	2	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5	3.7	3.9	4.2
Desp_Matriz [mm]	0	1.8	5.4	9	12.6	16.2	19.8	16.2	12.6	9	5.4	0
Fuerza_Pisa_Matriz [N]	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	0	0	0	0	0
Fuerza_pisa_Punzón [N]	-720	-720	-720	-720	-720	-720	-720	0	0	0	0	0

Tabla 5-7 Vectores Etapa_1

Las fuerzas de los dos pisas, comienzan a aplicarse al mismo tiempo sobre la placa de forma constante y desde el comienzo de la simulación, para evitar que la placa se mueva antes de que la matriz comience a desplazarse (ver secuencia de movimientos).

En la gráfica que aparece a continuación, se puede ver de una forma más clara el avance, en este caso, de la matriz. Se puede destacar:

- Desplazamiento máximo de la matriz: En $t = 3.1$ seg. el punzón está en la posición más alta $U_z = 19,8$ mm.
- Los pisas están situados muy cerca de la placa deformada y comienzan a ejercer una fuerza constante al mismo tiempo, con las direcciones indicadas en la Tabla 5-7.
- Todos los vectores de fuerza comienzan a actuar a partir de $t = 2$ seg. (justo donde ha terminado la Etapa_0)
- Como se podrá ver en los resultados finales de la etapa_1, ésta se detiene en el segundo $t = 3.47$ seg, porque como se ha comentado con anterioridad, la placa comienza a desplazarse demasiado de su posición, cuando se retiran todos los troqueles. Se necesita, por lo tanto, que ésta esté lo más horizontal posible. De esta forma, es más fácil colocar las herramientas de la siguiente etapa.

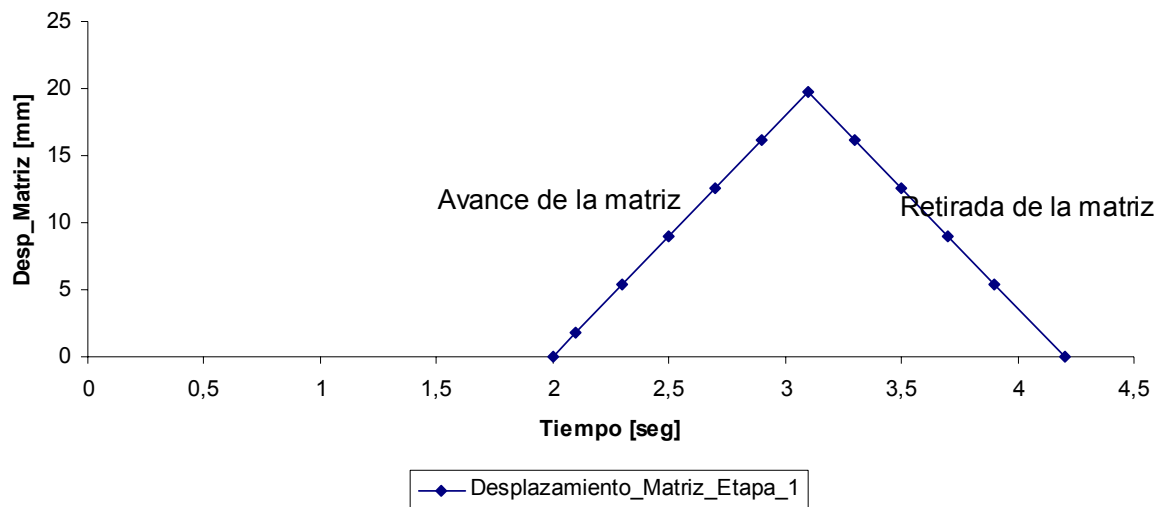


Figura 5-5 Vector desplazamiento de la Matriz Etapa_1

5.3.2.3. Etapa_2: Tercera Embutición

▪ Esquema del Conjunto Etapa 2

El Conjunto_Etapa_2 está formado, como se puede ver en la Figura 5-6, por: punzón, matriz, pisa_matriz y de nuevo las áreas 1 y 2, para que sean seis componentes de nuevo (contando con la placa).

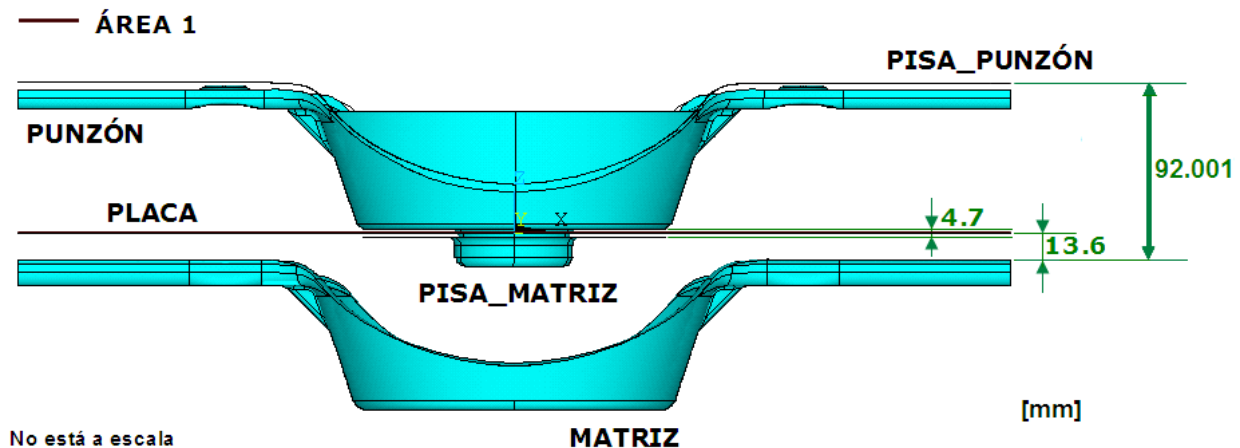



Figura 5-6 Esquema acotado del Conjunto_Etapa_2

▪ Secuencia de movimientos de las herramientas

La placa se encuentra aprisionada entre el pisa_matriz y el punzón. En este caso, al igual que en la Etapa_1, las tres herramientas se encuentran muy cerca de la placa, para evitar que ésta pueda moverse antes de que la matriz comience a desplazarse.

- La matriz, comienza a desplazarse en dirección Z positivo. En ese instante el pisa_matriz comienza a ejercer una fuerza con la misma dirección y sentido que el desplazamiento de la matriz.
- Aproximadamente, en el segundo $t = 4,3$ la matriz entra en contacto con la placa y comienza a embutirla. El resto de los elementos del conjunto permanece en su posición inicial.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 5 Página: 111
--	--------------------------------------	---------------------------------

- Cuando la matriz se desplaza $U_z = 90 \text{ mm}$ ($t = 8.45 \text{ seg}$), finaliza la carrera de avance de la matriz y comienza el retroceso de la misma. Justo en ese instante el pisa_matriz deja de aplicar fuerza.

▪ Parámetros de las herramientas

Los componentes del Conjunto Etapa_2, mantienen los parámetros introducidos en la Etapa_1 exceptuando:

- El número del material (ver "Full Restart").
- Las restricciones, ya que la secuencia de movimientos de los componentes del conjunto es diferente.
- El nombre de los componentes y no son los mismos que en la anterior.
- El número de Parte (PART ID).

	COMPONENTES DEL CONJUNTO ETAPA_2				
PARÁMETROS	Punzón	Matriz	Pisa_Matriz	Área 1	Área 2
Tipo de Elemento	Shell 163	Shell 163	Shell 163	Shell 163	Shell 163
Constantes Reales	R1	R1	R1	R1	R1
Número de Material	12	13	14	15	16
Modelo de Material	Rigid Material	Rigid Material	Rigid Material	Rigid Material	Rigid Material
Restricciones	- Todos los desplazamientos - Todos los giros	- Desplazamiento en ejes X e Y - Todos los giros	- Desplazamiento en ejes X e Y - Todos los giros	- Desplazamiento en ejes X e Y - Todos los giros	- Desplazamiento en ejes X e Y - Todos los giros
Nombre de los Componentes	Punzón_Etapa_2	Matriz_Etapa_2	Pisa_Matriz_Etapa_2	Área1_Etapa_2	Área2_Etapa_2
Nº de Parte	2	4	6	3	5
Contacto entre Superficies	ASTS	ASTS	ASTS	ASTS	ASTS

Tabla 5-8 Vectores Etapa_2

- Vectores aplicados: Los vectores aplicados, definidos en la Etapa_2, son los siguientes:

Tiempo [seg]	3.47	4.45	5.45	6.45	7.45	8.45	9.45	10.45	11.45	12.45	13.45
Desp_Matriz [mm]	0	18	36	54	72	90	72	54	36	18	0
Fuerza_Pisa_Matriz [N]	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	0	0	0	0	0

Tabla 5-9 Vectores Etapa_2

Las fuerzas de los dos pisas, comienzan a aplicarse al mismo tiempo sobre la placa de forma constante y desde el principio de la simulación, para evitar que la placa se mueva antes de que la matriz inicie su desplazamiento. Ver secuencia de movimientos de esta etapa.

En la gráfica que aparece a continuación, se puede ver de una forma más clara el avance, en este caso, de la matriz. Se puede destacar:

- Desplazamiento máximo de la matriz: En $t = 8,45$ seg la matriz está en la posición más alta $U_z = 90$ mm.
- Los pisas están situados muy cerca de la placa deformada y comienzan a ejercer una fuerza constante al mismo tiempo.
- Todos los vectores comienzan a actuar en el segundo $t = 3.47$ segundos (justo donde ha terminado la Etapa_1).

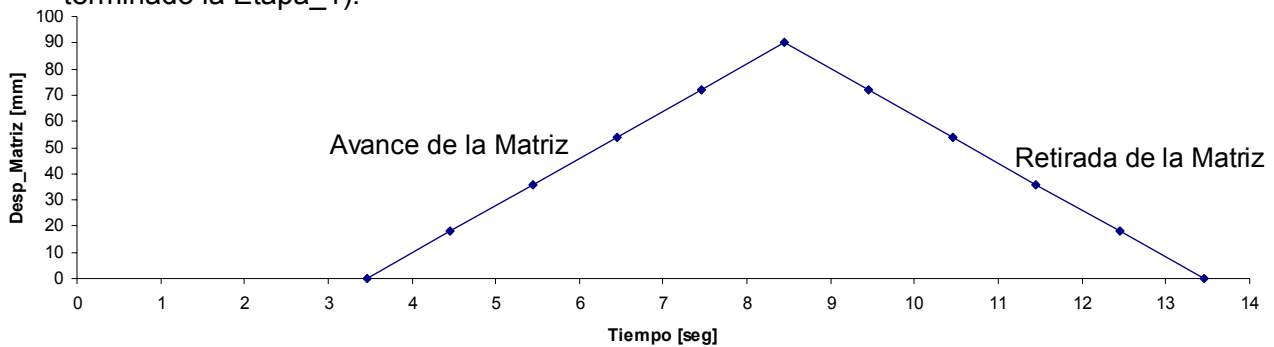


Figura 5-7 Vector desplazamiento de la Matriz Etapa_2

5.4. Resultados

5.4.1. Obtención de los Resultados

Teniendo en cuenta el proceso de fabricación de la pieza, partiendo de una placa lisa y pasando por las tres etapas de embutición, se trata de comparar las mediciones más representativas que definen la geometría de la pieza del modelo simulado con la pieza real. Dichas mediciones serán:

- La profundidad de embutición en la línea $y=0$ de la placa, según cada etapa de fabricación, puesto que es un proceso de embutición y es el parámetro más representativo.
- El ángulo de embutición en la línea $y=0$ de la placa, según cada etapa de fabricación, como indicador de la recuperación ("springback") del material después de cada embutición.

Para ello, a lo largo del eje $y=0$ se han definido unos tramos de la placa donde se han obtenido mediciones, tanto de profundidad como del ángulo de embutición, delimitando las zonas de embutición:

- Tramos considerados para las mediciones en las embuticiones de las etapas 0 y 1:
 - Tramo 1: $X = -66$ a $X = 0$
 - Tramo 2: $X = 0$ a $X = 66$
- Considerados para las mediciones en la embutición de la etapa 2, que se realiza en una zona diferente (ver Etapa 2).
 - Tramo 3: $X = -120$ a $X = -70$
 - Tramo 4: $X = 70$ a $X = 120$

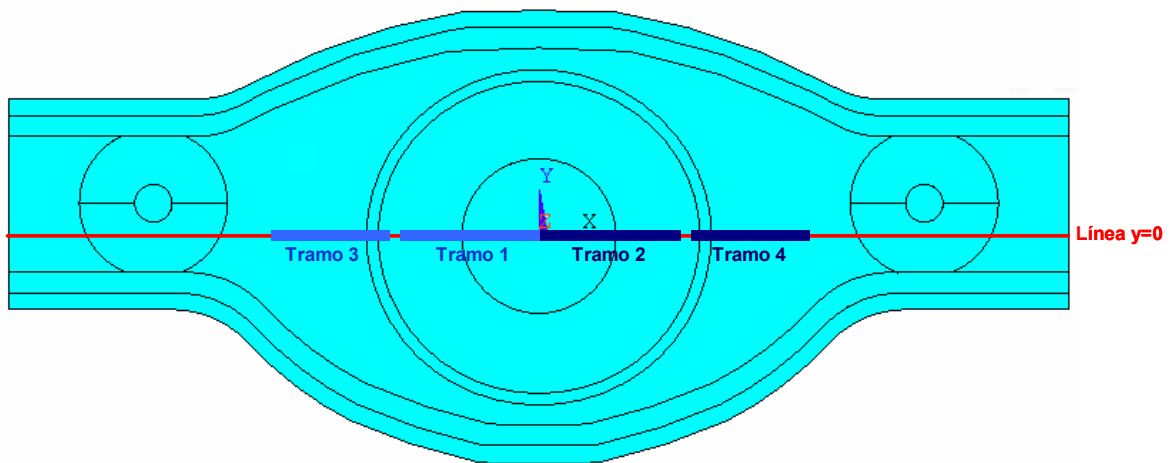


Figura 5-8 Tramos considerados para las mediciones

Para obtener los resultados requeridos en cada tramo es necesario determinar los nodos del modelo de la placa (mallado) que pertenecen a cada tramo.

En primer lugar, puesto que los nodos no tienen por qué pertenecer a la línea $y = 0$, es necesario realizar una aproximación en la que se eligen todos los nodos pertenecientes a la banda entre $y = -0,7\text{mm}$ e $y = 0,7\text{mm}$ y considerar que dichos nodos pertenecen a la línea $y = 0$. Con esta aproximación se obtiene un número de nodos suficiente para poder realizar las mediciones deseadas.

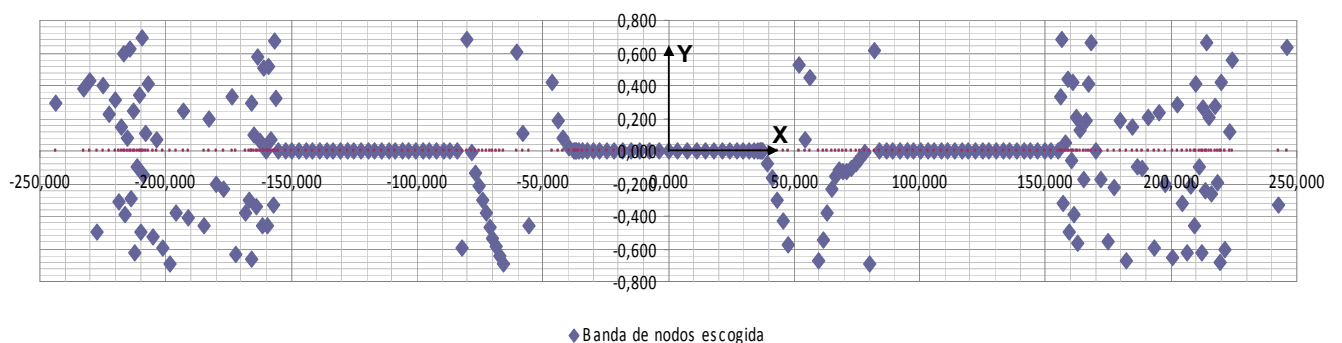


Figura 5-9 Aproximación de la cota “y” de los nodos entre $-0,7\text{mm} > y < 0,7\text{mm}$ a $y = 0$

A continuación, de todos los nodos elegidos, se realizará una segunda selección de forma que queden los nodos incluidos dentro de cada uno de los tramos considerados, para cada una de las etapas.

5.4.2. Etapa_0: Primera embutición

5.4.2.1. Resultados

Placa Simulada:

Se van a representar cuatro momentos representativos que muestran no sólo la distribución de las tensiones sobre la chapa si no también los valores alcanzados en esos momentos. Se va a presentar la placa deformada según el diagrama de tensiones de Von Mises. Las unidades de las tensiones reflejadas en las siguientes figuras son [MPa].

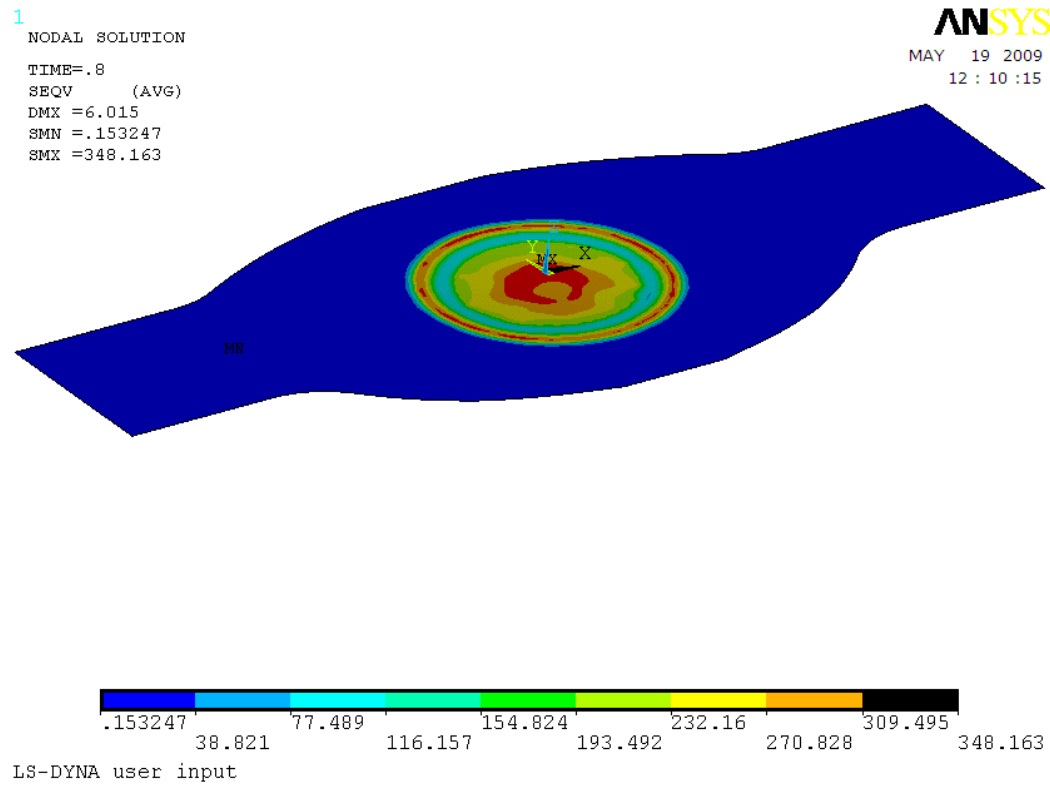


Figura 5-10 Placa Etapa_0, punzón impactando con la placa sin deformar (t = 0.8 seg)

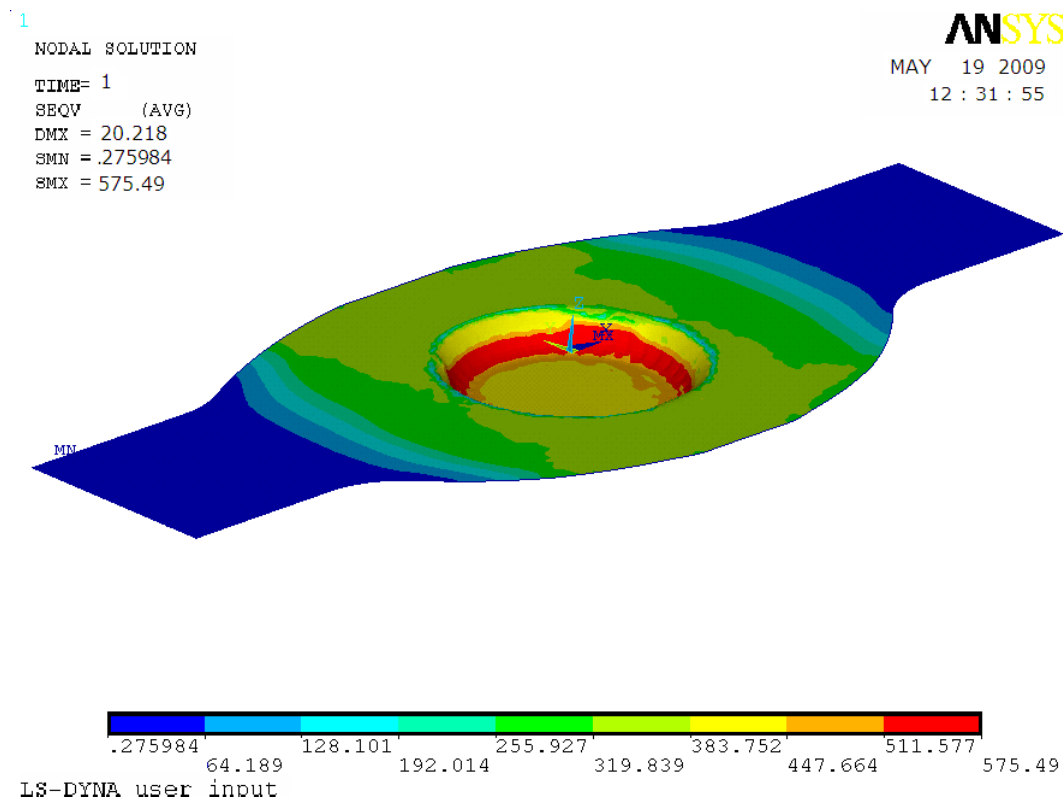


Figura 5-11 Placa Etapa_0, máxima profundidad de embutición (t = 1 seg)



1

NODAL SOLUTION

TIME=1.5

SEQV (AVG)

DMX =19.841

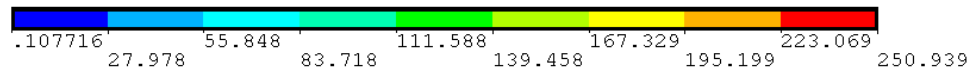
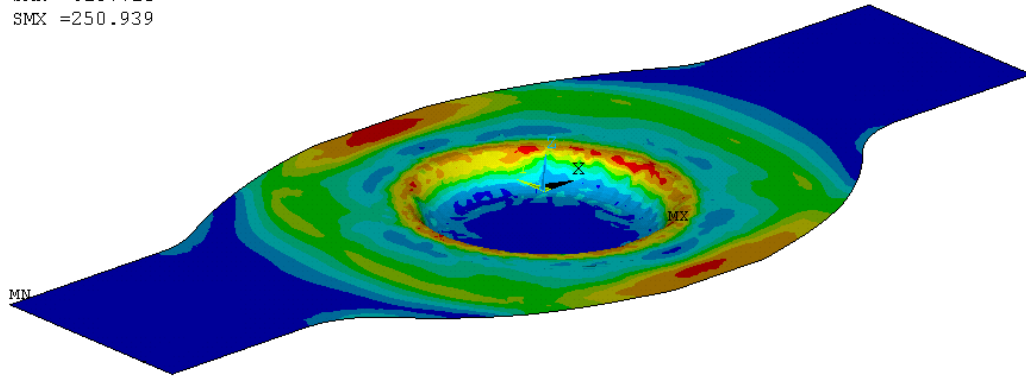
SMN =.107716

SMX =250.939

ANSYS

MAY 19 2009

12 : 35 : 40



LS-DYNA user input

Figura 5-12 Placa Etapa_0, retirada del punzón (t = 1.5 seg)

1

NODAL SOLUTION

TIME=2

SEQV (AVG)

DMX =17.436

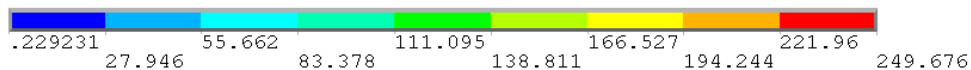
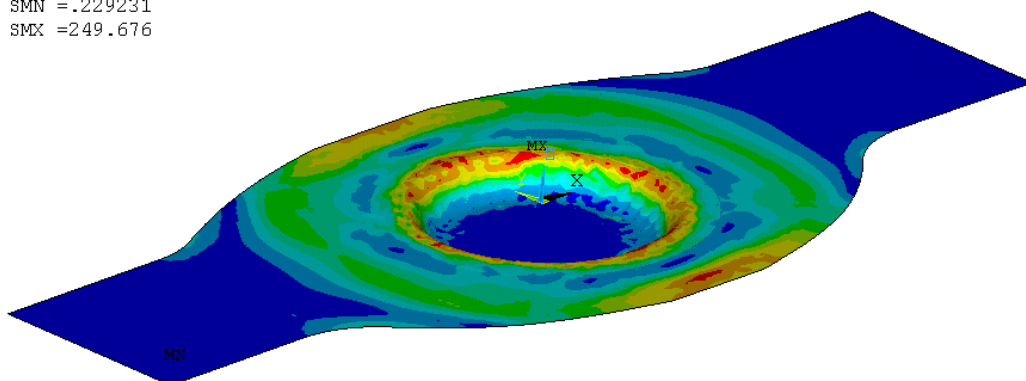
SMN =.229231

SMX =249.676

ANSYS

MAY 19 2009

18 : 10 : 00



LS-DYNA user input

Figura 5-13 Placa Etapa_0, final de la embutición (t = 2 seg)

Como se puede ver en la Figura 5-11, las mayores tensiones se producen en la zona central de la placa, correspondiente como era de esperar a la de máxima deformación de la embutición, cuando el punzón llega al punto más bajo en $t = 1$ segundo.

El desarrollo de la embutición es correcto y las tensiones máximas alcanzadas 511-575 MPa, son valores razonables y no excesivamente grandes, por debajo de su límite de rotura. El acero modelizado es un acero de bajo contenido en carbono ($C \leq 0,08\%$) que resulta de fácil maquinabilidad (ver Anexo A).

En la Figura 5-12 y la Figura 5-13, se observan unas tensiones que se extienden desde la parte central de la placa hasta los laterales, una vez que el punzón y el pisa se han retirado. Se trata de tensiones residuales. Hay que tener en cuenta que las piezas embutidas pueden llegar a tener unas tensiones residuales internas muy altas, que en este caso son aproximadamente la mitad de las máximas alcanzadas durante el proceso. Aún así, es interesante estudiar la formación de estas tensiones y a qué zonas afectan.

Una vez que ha finalizado la simulación, se van a realizar una serie de medidas sobre la placa simulada que permitirán validar el resultado obtenido en comparación con las medidas reales de la pieza real embutida.

En la siguiente figura se puede ver con más claridad qué es lo que se quiere medir sobre la placa una vez que ha sido deformada.

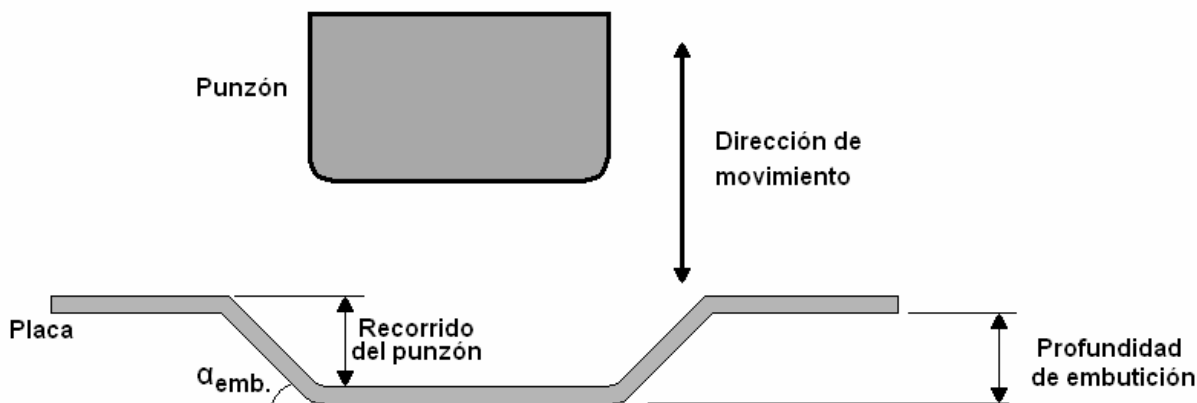


Figura 5-14 Esquema de las medidas realizadas en la placa simulada

Según los tramos definidos en la Figura 5-8, se extraen del fichero de ANSYS los desplazamientos de los nodos según los ejes X y Z (se recuerda la aproximación de $y=0$). De todos los resultados obtenidos, tal y como se ha comentado, se escogen los relativos a los nodos que se encuentran en la banda definida en la Figura 5-9 y que pertenecen además a los tramos 1 y 2. Los resultados, que se muestran en la tabla, son:

Tramo 1 ($-66 < x < 0$)			Tramo 2 ($0 < x < 66$)		
Nodo	x_{0s} (mm)	z_{0s} (mm)	Nodo	x_{0s} (mm)	z_{0s} (mm)
27050	-65,13	-1,18	25519	3,55	-16,81
26710	-59,53	-2,18	25549	7,54	-16,81
26835	-57,63	-4,08	25579	11,45	-16,80
27017	-55,88	-5,94	25609	15,25	-16,79



Tramo 1 (-66<x<0)			Tramo 2 (0<x<66)		
Nodo	x_{0s} (mm)	Z_{0s} (mm)	Nodo	x_{0s} (mm)	z_{0s} (mm)
30353	-49,39	-14,31	25639	18,89	-16,78
28607	-47,05	-15,68	25669	22,34	-16,77
28916	-44,73	-16,63	25699	25,57	-16,76
29279	-42,35	-16,80	25729	28,53	-16,75
24949	-40,13	-16,81	25789	33,52	-16,73
25069	-39,90	-16,82	25819	35,49	-16,71
25099	-39,19	-16,83	25849	37,06	-16,69
25129	-38,03	-16,83	25879	38,22	-16,68
25159	-36,46	-16,84	29583	41,47	-16,65
25189	-34,49	-16,85	29220	43,53	-16,50
25219	-32,16	-16,86	28579	45,62	-15,78
25249	-29,49	-16,86	30321	47,71	-14,64
25279	-26,53	-16,86	28006	49,51	-13,33
25309	-23,31	-16,85	30804	52,69	-8,73
25339	-19,86	-16,85	30718	54,10	-6,56
25369	-16,21	-16,84	26785	55,41	-5,12
25399	-12,42	-16,84	30157	58,09	-2,40
25429	-8,50	-16,83	30112	59,81	-1,12
25459	-4,51	-16,83	29933	61,67	-0,96
25489	-0,48	-16,82	27886	64,86	-0,99

Tabla 5-10 Resultados de la Simulación Etapa 0

Donde:

- x_{0s} = posición de los nodos de la placa simulada en la Etapa_0 una vez que la placa ha sido embutida.
- z_{0s} = cota de los nodos de la placa simulada después de la embutición ($Z_{inicial} = 0$, la placa se encuentra en el plano XY).

Placa Real:

Los datos de la placa real se extraen de una medición mediante una MMC, en formato IGES, de forma que puede ser importado en ANSYS para conocer las coordenadas de todos los puntos de la línea, que se encuentra en el plano $y=0$. Estos puntos no se corresponden con los nodos del mallado de la placa, motivo por el cual se escogen los más cercanos al eje X.

A pesar de no tratarse de los mismos puntos, se puede establecer una comparación ya que los datos tomados están muy cerca de la línea $y=0$, según el criterio explicado, luego su comportamiento frente a la deformación, va a ser similar al experimentado por los medidos sobre la placa real. La siguiente figura muestra el escaneado de la placa después de la Etapa_0. Sobre estos puntos se va a medir la profundidad y el ángulo de embutición.

Como se puede observar, en el escaneado se obtienen algunos puntos que aparentemente no corresponden a la placa, saltos del escaneado, y que será necesario discriminar para el análisis comparativo. Estos saltos, son puntos que aparecen al abrir el archivo, en el que se encuentran, en ANSYS y que tienen unas coordenadas que se alejan bastante de la línea sobre la que se ha medido, por lo tanto, hay que desecharlos

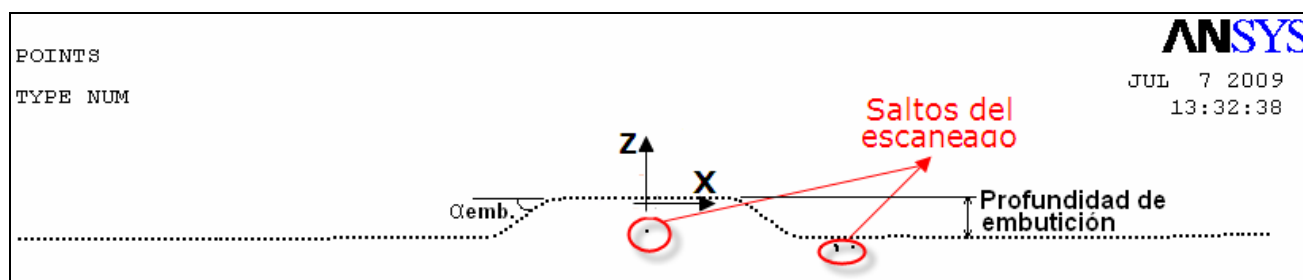


Figura 5-15 Escaneado de la placa real embutida

En la siguiente tabla se presentan los datos que se encuentran dentro de los tramos 1 y 2.

Tramo 1 ($-66 < x < 0$)		Tramo 2 ($0 < x < 66$)	
x_{0R} (mm)	z_{0R} (mm)	x_{0R} (mm)	z_{0R} (mm)
-65,78	1,15	1,04	-14,79
-63,24	1,11	3,58	-14,81
-60,45	0,83	6,12	-14,82
-57,73	-0,54	8,66	-14,84
-55,60	-2,03	11,20	-14,85
-53,54	-3,51	13,74	-14,86
-51,48	-5,00	16,27	-14,87
-49,42	-6,49	18,81	-14,87
-47,36	-7,98	21,35	-14,87
-45,31	-9,50	23,89	-14,87
-43,29	-11,02	26,43	-14,87
-41,27	-12,45	28,97	-14,86
-39,17	-13,60	31,50	-14,83
-36,89	-14,33	33,98	-14,73
-34,47	-14,68	36,40	-14,43
-31,99	-14,79	38,70	-13,79
-29,46	-14,82	40,85	-12,70
-26,92	-14,82	42,90	-11,31
-24,38	-14,82	44,93	-9,79
-21,84	-14,82	46,98	-8,27
-19,30	-14,82	49,04	-6,78



Tramo 1 (-66<x<0)		Tramo 2 (0<x<66)	
x _{0R} (mm)	Z _{0R} (mm)	x _{0R} (mm)	Z _{0R} (mm)
-16,76	-14,82	51,10	-5,29
-14,22	-14,81	53,17	-3,81
-11,68	-14,80	55,25	-2,32
-9,14	-14,79	57,36	-0,88
-6,59	-14,78	59,79	0,51
-4,05	-14,78	62,79	0,96
-1,51	-14,79	65,38	1,01

Tabla 5-11 Mediciones en la pieza real (escaneado) Etapa_0Comparación entre la Placa Simulada y la Real:

A continuación, se presenta la gráfica correspondiente a los resultados de los desplazamientos obtenidos, tanto para la placa soporte real como para la simulada. Hay que aclarar que se ha desplazado la simulada con respecto a la real con el fin de facilitar la visualización de ambas curvas.



Etapa_0

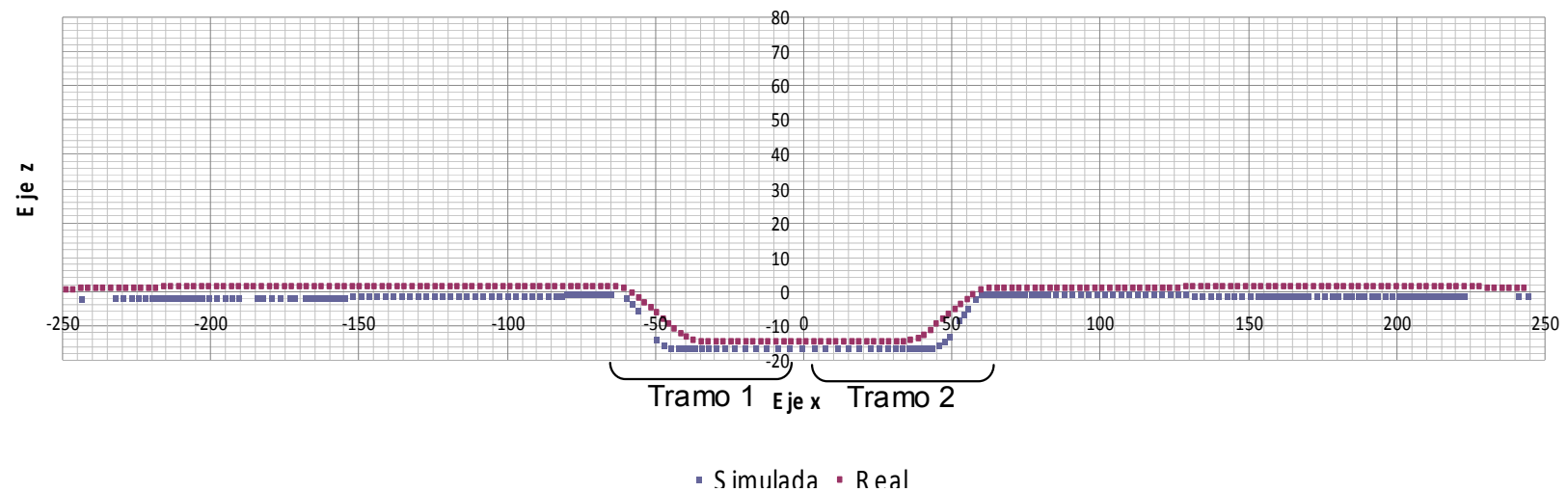


Figura 5-16 Resultados Etapa_0

Mediciones:

Se incluyen en la siguiente tabla, las mediciones obtenidas tanto de profundidad como de ángulo de embutición en cada uno de los tramos considerados. Las mediciones están reflejadas para la pieza simulada y para la pieza real escaneada, de forma comparativa.

Tramo 1				Tramo 2			
Prof. Embutición		Angulo Embutición		Prof. Embutición		Angulo Embutición	
Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado
15,94 mm	15,64mm	33,57°	50,11°	15,80mm	15,82mm	34,40°	51,03°

Tabla 5-12 Profundidad y ángulo de embutición de las placas real y simulada, Etapa_0

Para ver con más detalle cómo se han realizado las medidas a partir de los nodos de la placa simulada, la Figura 5-17 muestra una ampliación de la zona central de la embutición.

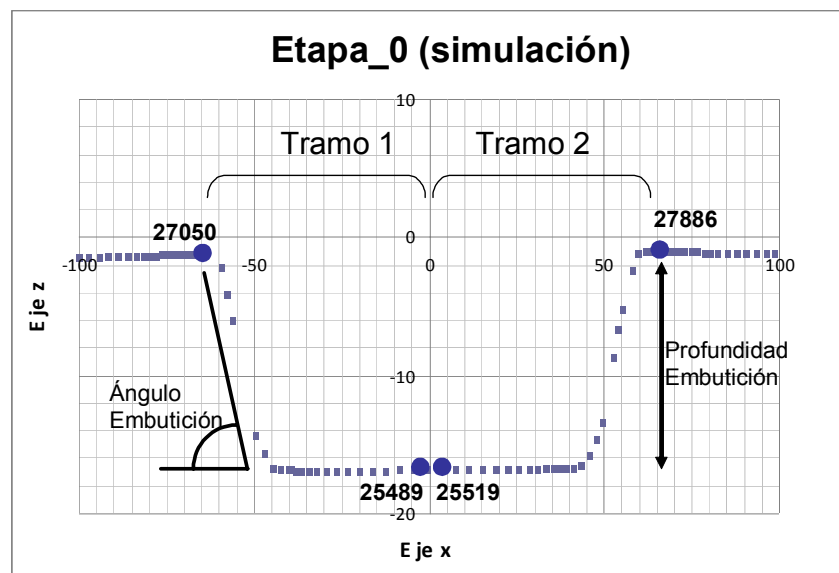



Figura 5-17 Detalle de los resultados de la embutición de la Etapa_0

5.4.2.2. Análisis de los Resultados

Haciendo un análisis de los resultados presentados en la sección anterior se pueden destacar los siguientes aspectos:

- En una primera vista general de la Figura 5-16 se puede comparar la deformación obtenida de la placa simulada respecto a la placa real. Se observa que la deformación es similar en los dos casos. En concreto se aprecia que la profundidad de embutición es muy parecida, aunque visualmente cabe destacar una diferencia en el ángulo de embutición, de forma que el ángulo en el caso simulado es mayor que el real.
- Analizando los resultados numéricos proporcionados en la Tabla 5-12, se corroboran dichas apreciaciones. Las profundidades de embutición tienen una diferencia de 0,3 mm en el tramo 1 y de 0,02 mm en el tramo 2, mientras que el ángulo es más de 15° mayor en el caso de la simulación.

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 5</p> <p>Página: 122</p>
--	---	--

- Es también necesario destacar que existen diferencias entre los tramos 1 y 2, a pesar de la simetría de la placa respecto al eje Y tanto en el caso simulado como en el real. En el caso simulado la diferencia entre el tramo 1 y 2 es de 0,18 mm y en el caso real de 0,14 mm. Respecto a los ángulos de embutición la diferencia entre los dos tramos es de 1º aproximadamente en los dos casos.
- Comparativa entre los tramos 1 y 2 de la pieza real y de la simulada:

Profundidad de embutición: Para la profundidad de embutición, las diferencias entre el tramo 1 y 2 son del mismo orden (0,14-0,18mm) en el caso real y en el simulado. En ambos casos, la diferencia podría considerarse despreciable, teniendo en cuenta el valor de la profundidad y la tolerancia de fabricación (0,2 mm). Aunque el hecho de que se obtengan diferentes valores a cada lado del eje x tiene una explicación distinta en cada caso:

- En el caso real la diferencia entre el tramo 1 y 2 se puede atribuir a la propia fabricación de la pieza, al error de precisión en el escaneado de la pieza y al error que se transmite al exportar los valores del escaneado a ANSYS.
- En el caso simulado las posibles razones son diferentes. La diferencia entre el tramo 1 y 2, se debe achacar a la pequeña asimetría existente en el mallado de la placa. Como se puede observar en los nodos utilizados a lo largo del eje x, a cada lado del eje Y, no son del todo simétricos en posición y número.

Ángulo: Un análisis similar podría hacerse al comparar los ángulos de embutición en ambos casos.


- Comparativa entre los casos real y simulado:

Profundidad de embutición: Al comparar los valores entre el caso real y simulado se puede observar las diferencias entre las profundidades de embutición del caso real con el simulado. No son significativas, aunque las diferencias se pueden atribuir a:

- La precisión de las medidas del escaneado de la pieza real. Habría que considerar un error en las medidas del perfil de la pieza embutida.
- La modelización de la placa.
- Las diferencias entre la geometría de los troqueles en la simulación con las reales.
- Las diferencias en la dinámica de fabricación definida en la simulación con la real. Por ejemplo, en el modelo, la fuerza de los pisachapas es constante mientras que en la realidad es progresiva ya que están sujetos con resortes de compresión.

Ángulo: Sin embargo, en el caso del ángulo de embutición las diferencias sí son notables. En la simulación el ángulo de embutición es mayor (50,11º y 51,03º) que en el caso real (33,57º-34,40º). Estas diferencias pueden ser atribuidas a:

- El modelo de material utilizado en la simulación puede no representar adecuadamente el comportamiento real del acero de la placa soporte. Parece que la placa real tiene una mayor recuperación elástica (springback).

	UNIVERSIDAD CARLOS III	Capítulo : 5
	MADRID	Página: 123

5.4.3. Etapa_1: Segunda embutición

5.4.3.1. Resultados

Placa Simulada:

El resultado obtenido de la simulación se refleja en las siguientes figuras que, como en la etapa anterior, son imágenes de la placa deformada durante y al final de la embutición. En dichas figuras igualmente se puede observar las tensiones que la placa está sufriendo en cada momento. Se va a presentar la placa deformada con el diagrama de tensiones de Von Mises. Las unidades de las tensiones reflejadas en las siguientes figuras son [MPa].

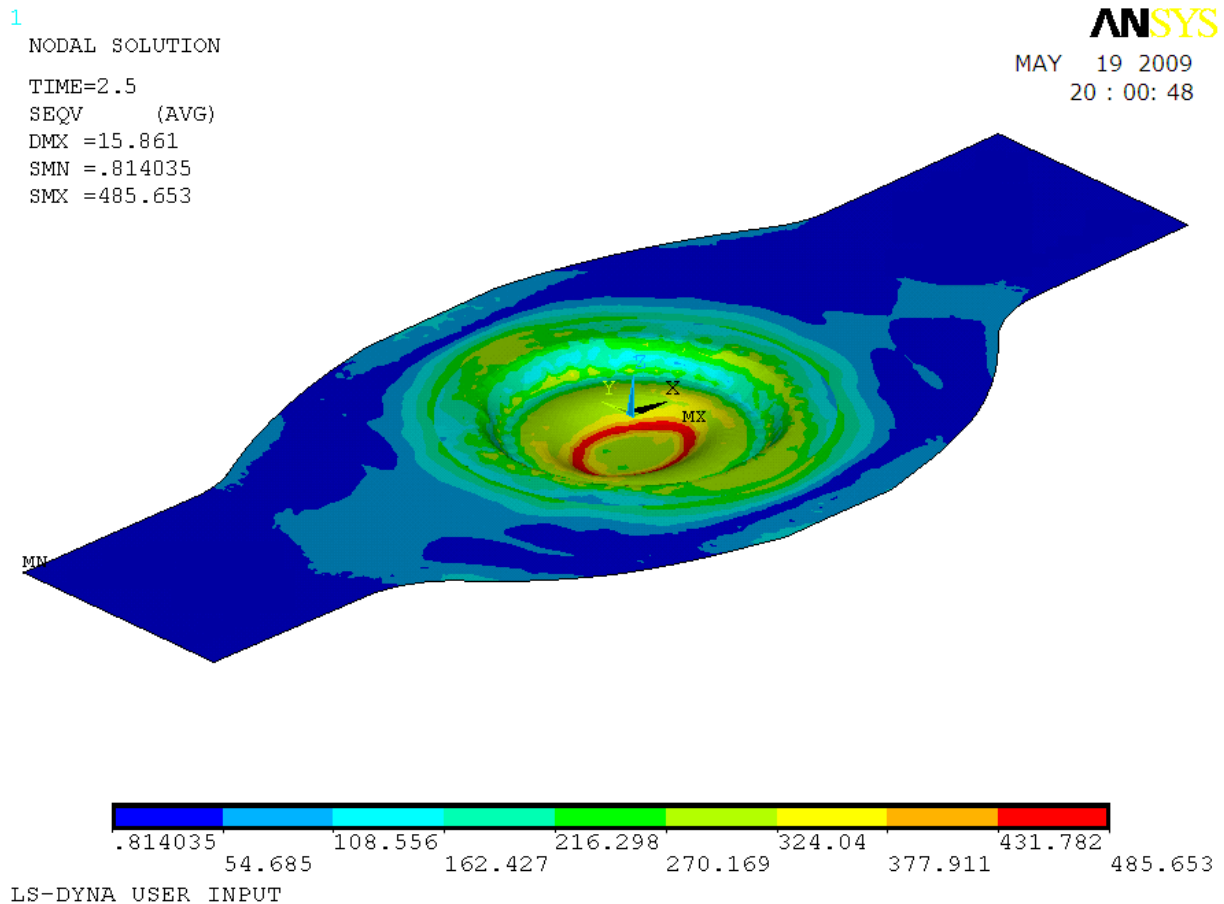


Figura 5-18 Placa Etapa_1 inicio de la simulación (t = 2.5 segundos)

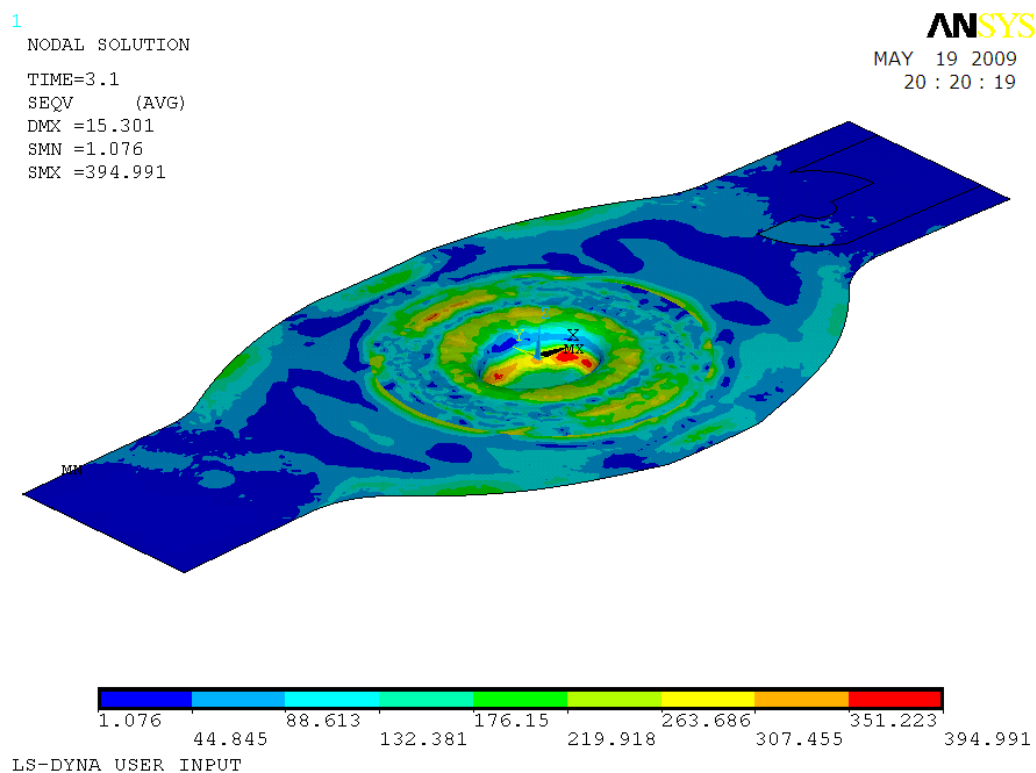


Figura 5-19 Placa Etapa_1 embutición máxima (t = 3.1 segundos)

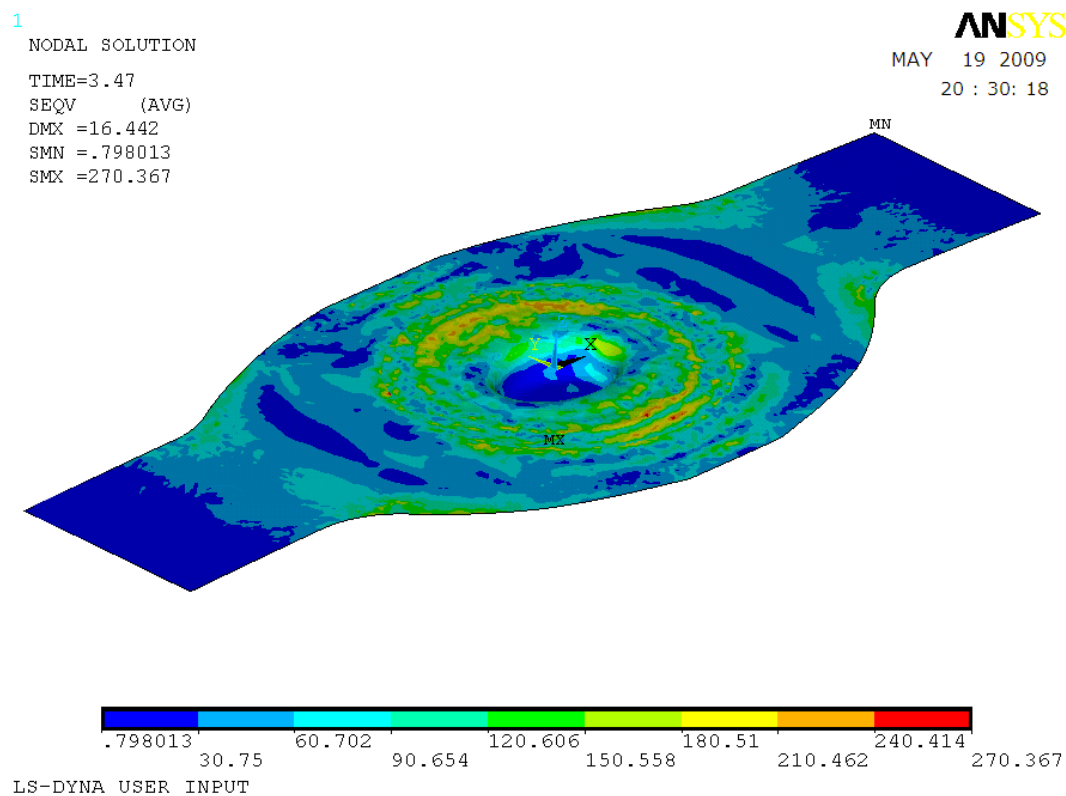


Figura 5-20 Placa Etapa_1 final de la simulación (t = 3.47 seg)

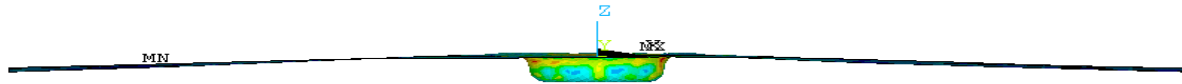


Figura 5-21 Detalle del perfil Placa Etapa_1 final de la simulación (t = 3.47 seg)

De acuerdo con la imagen de la placa una vez terminada la embutición se puede comprobar que ésta se deforma correctamente, no habiendo rotura de ninguna zona de la misma. Esta segunda embutición, se realiza sin problemas, gracias a la realización previa de la Etapa_0.

Las tensiones soportadas son menores, ya que se aumenta la profundidad de embutición en sólo dos milímetros respecto a la anterior, encontrándose las máximas antes de que la matriz llegue a su cota máxima (en torno a los 490 MPa).

Se puede ver cómo el material se resiste a ser deformado, en un principio, por las tensiones que se generan en esta zona. Aún así se obtienen, las tensiones máximas en la zona central de la placa, de nuevo la esperada porque es la que se trata de deformar de nuevo. El resto de la placa no soporta en estas dos primeras Etapas, más que la fuerza de los pisas. De nuevo se observan tensiones residuales que en este caso se extienden casi hasta las alas de la chapa, con valores en torno a la mitad de los alcanzados en instantes anteriores de la simulación.

A continuación, se procede a realizar una serie de medidas sobre la placa simulada que permiten validar el resultado obtenido. Se van a medir de nuevo, los dos parámetros que caracterizan la embutición: la profundidad y el ángulo de embutición.

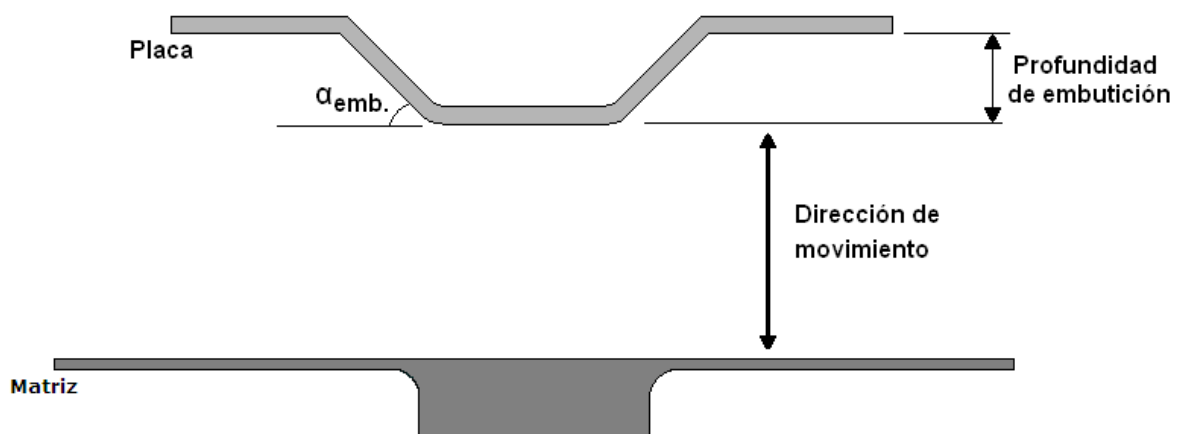



Figura 5-22 Esquema de las medidas realizadas en la placa simulada

Según los tramos definidos en la Figura 5-8, se extraen del fichero de ANSYS los desplazamientos de los nodos según los ejes X y Z (se recuerda la aproximación de $y=0$). De todos los resultados obtenidos tal y como se ha comentado, se escogen los relativos a los nodos que se encuentran en la banda definida en la Figura 5-9 y pertenecen además a los tramos 1 y 2. Los resultados son los siguientes:

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 5 Página: 126
--	--------------------------------------	---------------------------------

Tramo 1 (-66<x<0)			Tramo 2 (0<x<66)		
Nodo	X _{1s} (mm)	Z _{1s} (mm)	Nodo	X _{1s} (mm)	Z _{1s} (mm)
27050	-64,85	1,43	25489	-0,16	-16,28
26710	-59,34	1,55	25519	4,00	-16,27
26835	-56,67	1,45	25549	8,12	-16,27
27017	-54,13	1,51	25579	12,17	-16,26
30353	-43,90	2,08	25639	19,91	-16,23
28607	-41,29	2,29	25669	23,56	-16,10
28916	-38,75	2,05	25699	26,84	-14,65
29279	-36,30	1,32	25729	28,93	-11,96
24949	-34,03	0,28	25759	29,52	-8,61
25069	-33,80	0,14	25789	29,93	-5,65
25099	-33,13	-0,31	25819	30,74	-3,33
25129	-32,14	-1,25	25849	31,80	-1,70
25159	-30,95	-2,73	25879	32,75	-0,70
25189	-29,99	-4,97	24980	33,64	-0,01
25219	-29,54	-7,87	29583	35,99	1,11
25249	-28,86	-11,08	29220	38,18	1,61
25279	-27,05	-14,06	28579	40,43	1,94
25309	-23,97	-16,00	28006	44,99	1,71
25339	-20,30	-16,26	30804	50,20	1,34
25369	-16,48	-16,27	30718	52,69	1,38
25399	-12,52	-16,28	26785	54,64	1,44
25429	-8,46	-16,28	30157	58,46	1,40
25459	-4,33	-16,28	29924	63,83	1,32
25489	-0,16	-16,28	27886	65,37	1,30

Tabla 5-13 Resultados de la Simulación Etapa_1

- Donde:

- X_{1s} = posición de los nodos de la placa simulada en la Etapa_1 una vez que la placa ha sido embutida.

- Z_{1s} = cota de los nodos de la placa simulada después de la embutición (Z_{inicial} = 0, la placa se encuentra en el plano XY).

Placa Real:

Tal y como se ha hecho en la etapa anterior, se presentan los datos correspondientes a la deformación de la placa real, una vez embutida, en las siguientes figura y tabla (línea y=0). La

Figura 5-23 muestra el escaneado de la placa después de la Etapa_1. Sobre estos puntos se van a medir la profundidad y el ángulo de embutición.

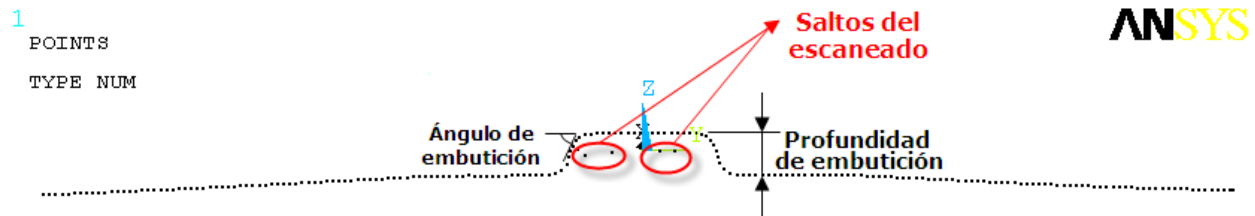



Figura 5-23 Escaneado de la Etapa_1

Los datos del escaneado que se encuentran dentro de los tramos 1 y 2, así como de la banda $-0.7\text{mm} < Y < 0.7\text{mm}$ son los siguientes:

Tramo 1 ($-66 < x < 0$)		Tramo 2 ($0 < x < 66$)	
X_{1R} (mm)	Z_{1R} (mm)	X_{1R} (mm)	Z_{1R} (mm)
-62,96	-3,70	1,51	-18,46
-60,38	-3,61	4,05	-18,46
-57,80	-3,66	6,59	-18,47
-55,26	-3,73	9,13	-18,49
-52,74	-3,80	11,67	-18,51
-50,22	-3,80	14,22	-18,54
-47,68	-3,78	16,76	-18,58
-45,16	-3,74	19,30	-18,63
-42,62	-3,66	21,80	-18,63
-40,09	-3,58	24,18	-18,42
-37,53	-3,47	26,38	-17,66
-34,81	-3,63	28,16	-16,26
-31,80	-4,91	29,24	-13,99
-30,68	-6,67	30,01	-11,65
-30,27	-9,71	30,36	-9,27
-29,90	-12,04	30,84	-6,41
-29,12	-14,34	34,19	-3,73
-28,00	-16,33	37,52	-3,39
-26,10	-17,73	40,10	-3,53
-23,80	-18,45	42,62	-3,62
-21,36	-18,64	45,16	-3,72
-18,84	-18,62	47,68	-3,79
-16,30	-18,58	50,21	-3,81

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 5 Página: 128
--	--------------------------------------	---------------------------------

Tramo 1 ($-66 < x < 0$)		Tramo 2 ($0 < x < 66$)	
X_{1R} (mm)	Z_{1R} (mm)	X_{1R} (mm)	Z_{1R} (mm)
-13,75	-18,54	52,73	-3,81
-11,21	-18,51	55,25	-3,73
-8,67	-18,49	57,78	-3,64
-6,12	-18,47	60,36	-3,55
-3,58	-18,47	62,95	-3,62
-1,04	-18,46	65,48	-3,72

Tabla 5-14 Mediciones en la pieza real (escaneado) Etapa_1

Comparación entre la Placa Simulada y la Real:

A continuación, se presenta la gráfica correspondiente a los resultados de los desplazamientos obtenidos, tanto para la placa soporte real como para la simulada. Hay que aclarar que se ha desplazado la simulada con respecto a la real con el fin de facilitar la visualización de ambas.

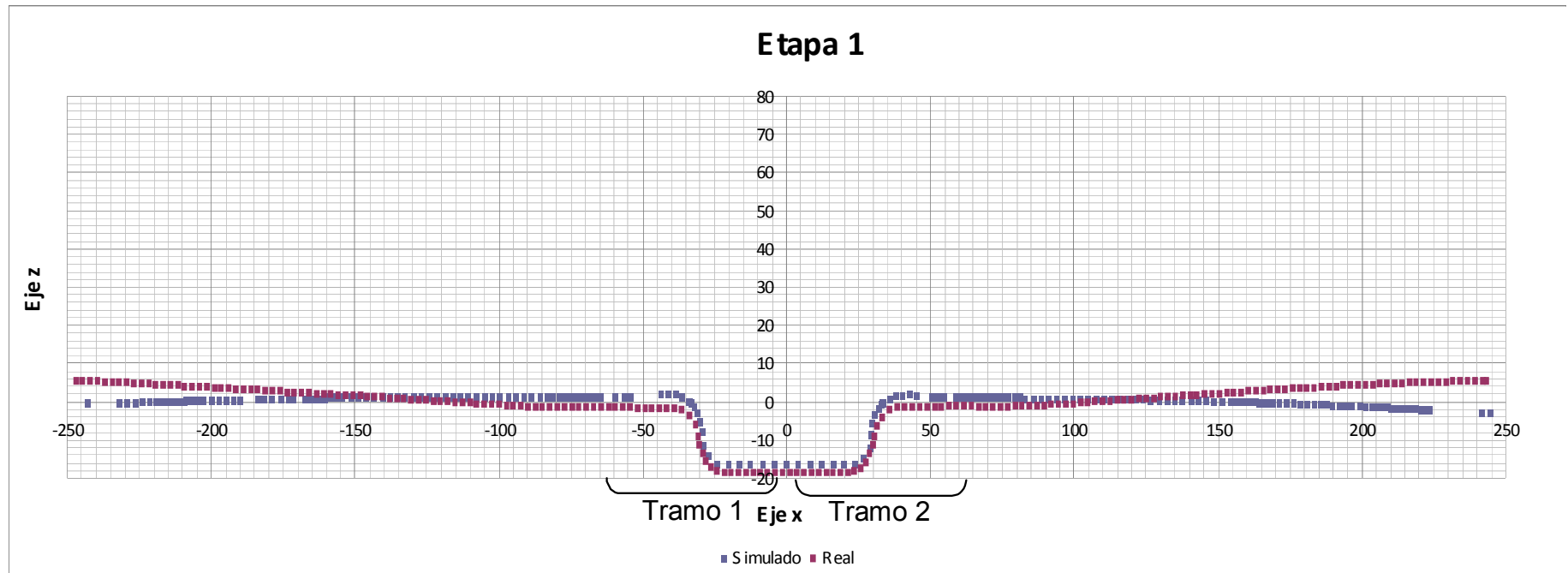


Figura 5-24 Resultados Etapa_1

Mediciones:

La siguiente tabla refleja las mediciones obtenidas tanto de profundidad de embutición como de ángulo de embutición en cada uno de los tramos considerados. Las mediciones están reflejadas tanto para la pieza simulada como para la pieza real escaneada, de forma comparativa.

Tramo 1				Tramo 2			
Prof. Embutición		Angulo Embutición		Prof. Embutición		Angulo Embutición	
Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado
17,27 mm	17,71 mm	46,94°	72,10°	17,44 mm	17,58 mm	43,64°	78,10°

Tabla 5-15 Profundidad y ángulo de embutición de las placas real y simulada, Etapa_1

Para ver con más detalle cómo se han realizado las medidas a partir de los nodos de la placa simulada, la Figura 5-25 muestra una ampliación de la zona central de la embutición.

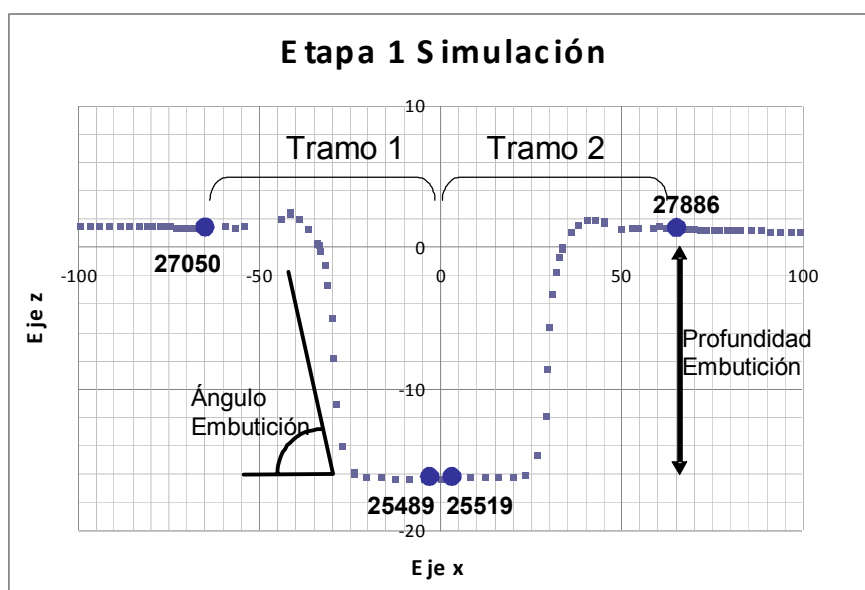



Figura 5-25 Detalle de los resultados de la embutición de la Etapa_1

5.4.3.2. Análisis de los Resultados

Haciendo un análisis de los resultados presentados para la Etapa_1 en la sección anterior se pueden destacar los siguientes aspectos:

- En una primera vista general de la Figura 5-24 se puede comparar la deformación obtenida de la placa simulada respecto a la placa real.
 - Se puede observar que la deformación es similar en los dos casos. En este caso, al igual que ocurría en la etapa 0, se aprecia que la profundidad de embutición es similar, aunque visualmente cabe destacar una diferencia en el ángulo de embutición.
 - Además se aprecia que los extremos de la placa tienen un ángulo diferente con respecto al eje x. En el caso real la placa tiene un ángulo positivo respecto al eje x, mientras que la placa simulada tiene un ángulo cercano a cero. Este efecto se puede

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 5 Página: 131
--	--------------------------------------	--

atribuir al alabeo que sufren los extremos de la placa durante la embutición. Se puede apreciar que las mediciones en la placa simulada han sido realizadas en un momento diferente que en la real, respecto al instante de embutición.

- Analizando los resultados numéricos proporcionados en la Tabla 5-15, se corroboran dichas apreciaciones. Las profundidades de embutición tienen una diferencia de 0,44 mm en el tramo 1 y de 0,14 mm en el tramo 2, mientras que el ángulo es de 25,16° en el tramo1 y 34,46° en el tramo 2, mayor en el caso de la simulación. Las diferencias en esta segunda embutición son algo mayores que en la Etapa_0.

- Comparativa entre los tramos 1 y 2 de la pieza real y de la simulada:

Profundidad de embutición: Como ocurría en la Etapa _0, existen diferencias entre los tramos 1 y 2, a pesar de la simetría de la placa respecto al eje Y tanto en el caso simulado como en el real. En el caso simulado la diferencia entre el tramo 1 y 2 es de 0,13mm y en el caso real de 0,17mm.


Ángulo: Respecto a los ángulos de embutición la diferencia entre los dos tramos es de 3° aproximadamente en el caso real y 6° en el simulado. Las diferencias en este caso son del mismo orden que las de la Etapa_0.

- Comparativa entre los casos real y simulado:

Profundidad de embutición: Para la profundidad de embutición las diferencias entre el tramo 1 y 2 son del mismo orden (0,13 - 0,17mm) en los dos casos, real y simulado. Como se concluía en la Etapa_0, la diferencia podría considerarse despreciable, teniendo en cuenta el valor de la profundidad y la tolerancia de fabricación teórica (0,2 mm).

Ángulo: Un análisis similar podría hacerse al comparar los ángulos de embutición en ambos casos.

- Como conclusión, se puede destacar que, al comparar los valores entre el caso real y simulado se observa que las diferencias entre las profundidades de embutición del caso real con el simulado son mayores que en la Etapa_0. Habría que tener en cuenta que puesto que la Etapa_1 parte del final de la Etapa_0, como punto de partida los errores cometidos y justificados esa etapa se podrían sumar. Esto lleva a pensar igualmente que las diferencias entre la simulación y la realidad no son significativas.
- Finalmente, al igual que ocurría en la etapa anterior en el caso del ángulo de embutición las diferencias sí son notables y en este caso mayores que en la Etapa_0. En la simulación el ángulo de embutición es mayor (72,10° y 78,10°) que en el caso real (46,95°-43,64°). Nada habría que añadir a lo indicado en la Etapa_0 excepto que los errores podrían sumarse tal como ocurre con la profundidad de embutición.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 5 Página: 132
--	--------------------------------------	---------------------------------

5.4.4. Etapa_2: Tercera embutición

5.4.4.1. Resultados:

Placa Simulada:

El resultado obtenido de la simulación se refleja en las siguientes figuras, que son imágenes de la placa deformada durante y al final de la embutición. En dichas figuras, igualmente se puede observar las tensiones que la placa está sufriendo en cada momento. Se va a presentar la placa deformada con el diagrama de tensiones de Von Mises. Las unidades de las tensiones reflejadas en las siguientes figuras son [MPa].

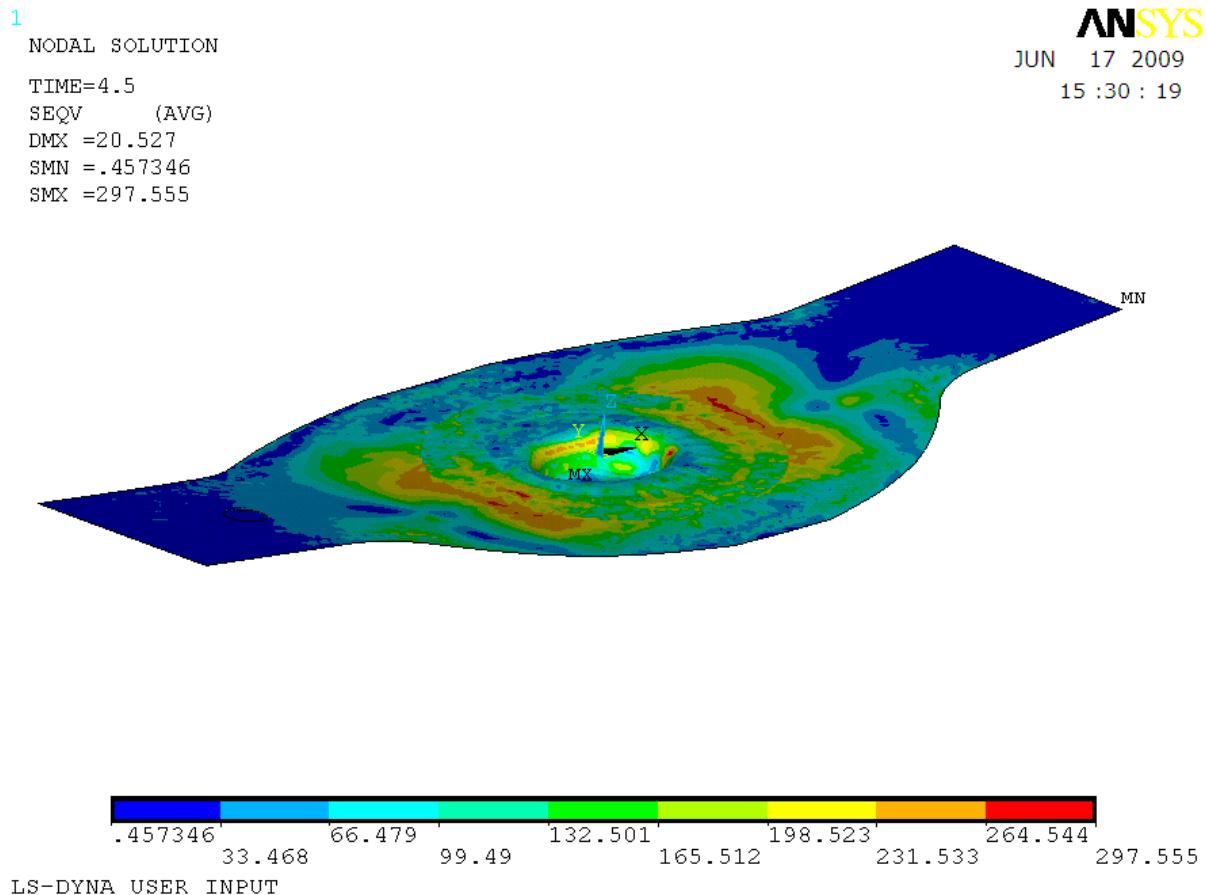


Figura 5-26 Placa Etapa_2 instantes iniciales de la simulación (t = 4.5 seg)

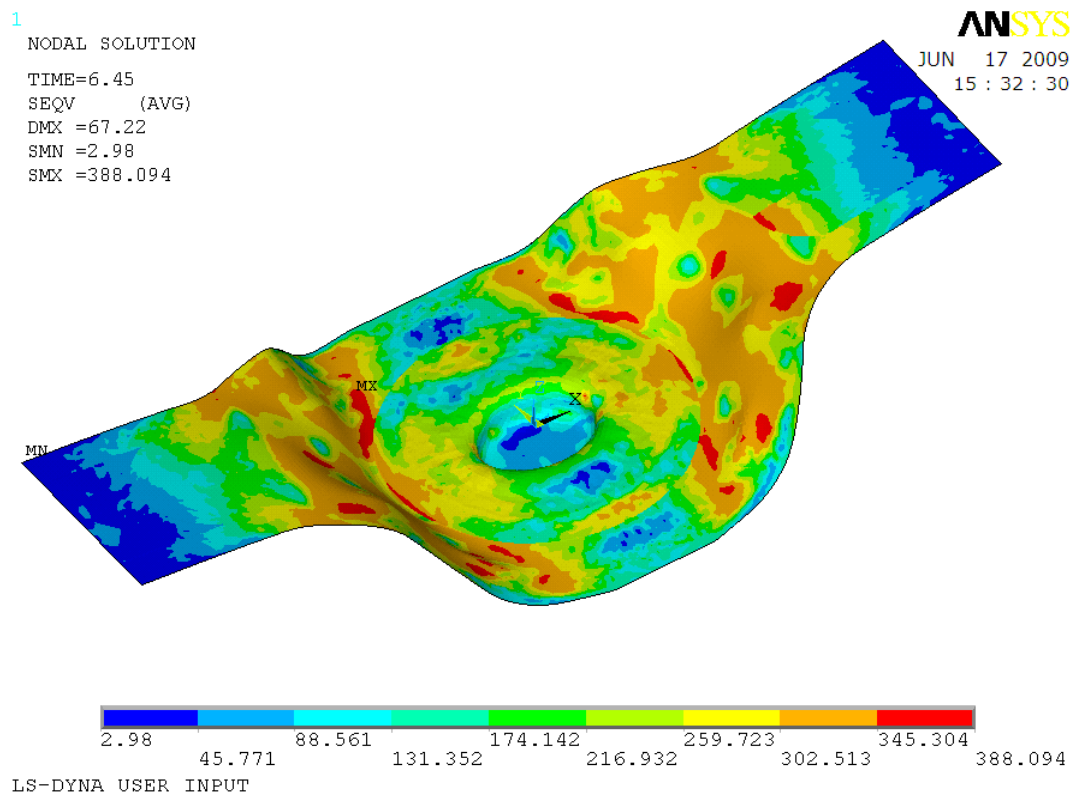


Figura 5-27 Placa Etapa_2, secuencia intermedia (t = 6.45 seg)

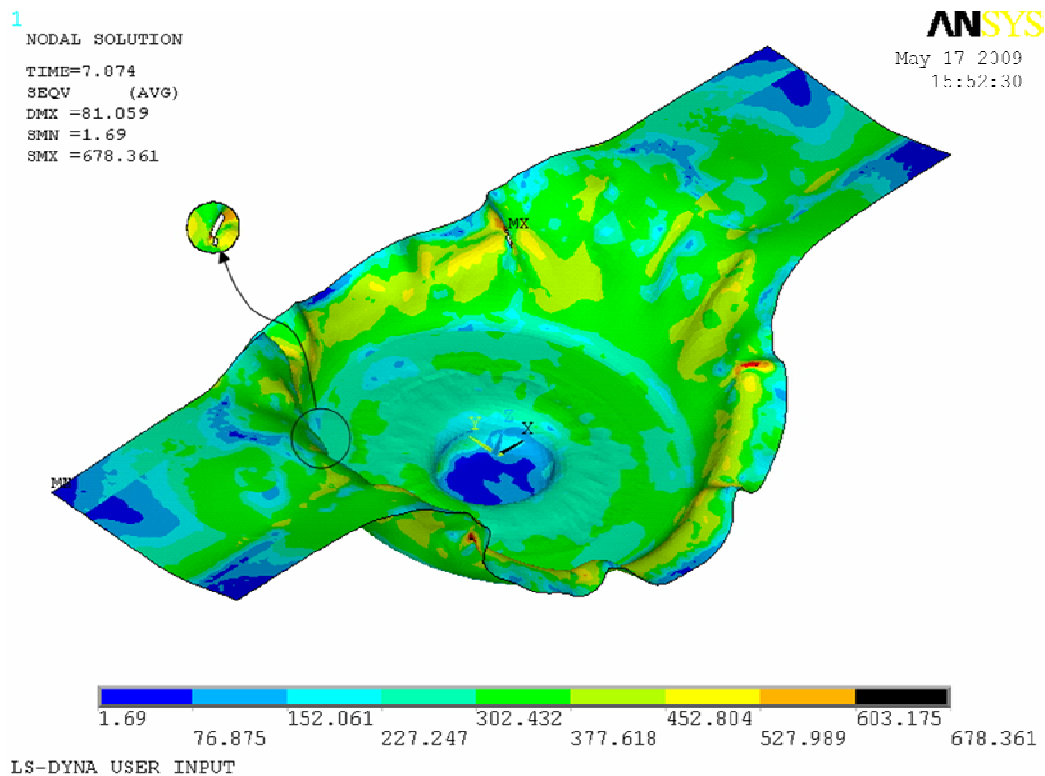


Figura 5-28 Etapa_2, final de la embutición con resultado de rotura parcial (t=7.8 seg)



1

NODAL SOLUTION

TIME=8.45

SEQV (AVG)

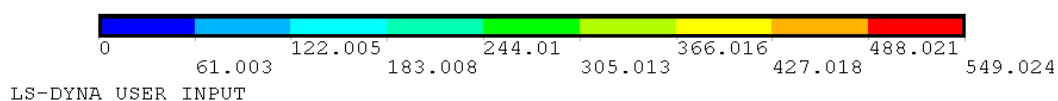
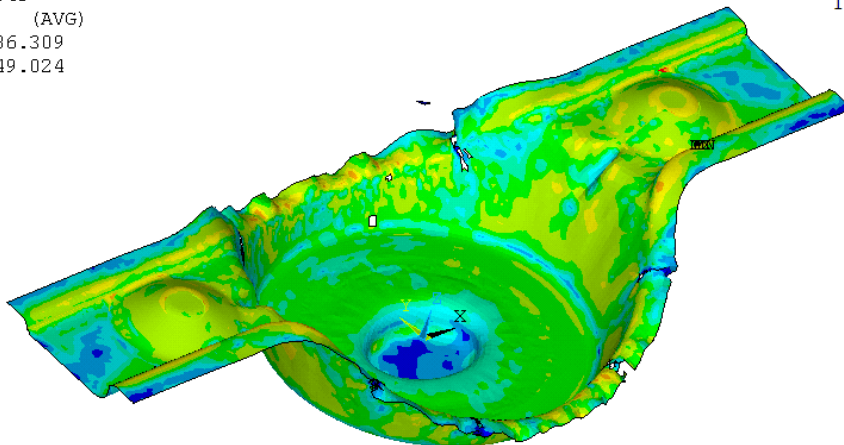
DMX =186.309

SMX =549.024

ANSYS

MAY 17 2009

15 : 50 : 30

**Figura 5-29 Etapa_2, final de la embutición con resultado de rotura parcial (t = 8.45 seg)**

1

NODAL SOLUTION

TIME=8.45

SEQV (AVG)

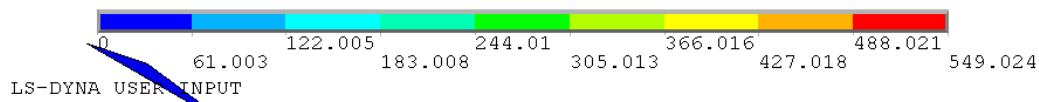
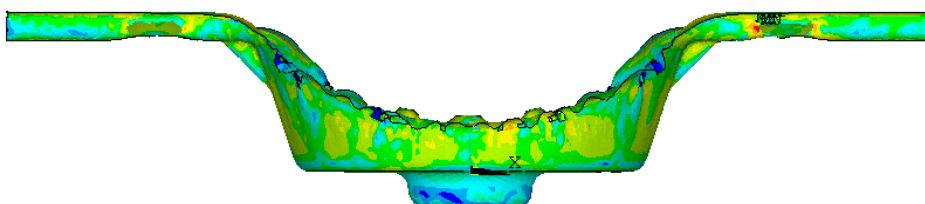
DMX =186.309


SMX =549.024

ANSYS

JUN 17 2009

16 : 04 : 22

**Figura 5-30 Vista de perfil del final de la Etapa_2 de la embutición instantánea (t = 8.45 seg)**

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 5 Página: 135
--	--------------------------------------	---------------------------------

De acuerdo con la imagen de la placa una vez terminada la embutición se puede comprobar que hay rotura de parte de la misma. En el segundo 7.8 de la simulación, comienzan a concentrarse una serie de tensiones localizadas en los laterales de la placa, resultados de las crestas formadas durante la embutición. Las tensiones que provocan la rotura son apreciablemente mayores que las máximas tensiones que se han producido en el resto del proceso (678 MPa).

Se puede decir que el modelo de material escogido para modelizar el sistema real no se está comportando adecuadamente, puesto que en el caso real no hay rotura. Además la rotura que se produce no es del todo simétrica, puesto que en uno de los laterales se rompe en dos puntos y en el otro lateral sólo en uno, posiblemente por la pequeña falta de simetría del mallado.

Sin embargo hay que destacar que la forma conseguida en la placa una vez que se han retirado las herramientas, refleja la que tiene la chapa después de esa embutición, exceptuando las crestas formadas que deberían haber desaparecido una vez que la matriz ha subido hasta la cota máxima de embutición.

Finalmente, como en las etapas anteriores, se trata de realizar una serie de medidas sobre la placa simulada que nos permitan validar el resultado obtenido. La siguiente figura explica las mediciones que se pretenden realizar en este caso:

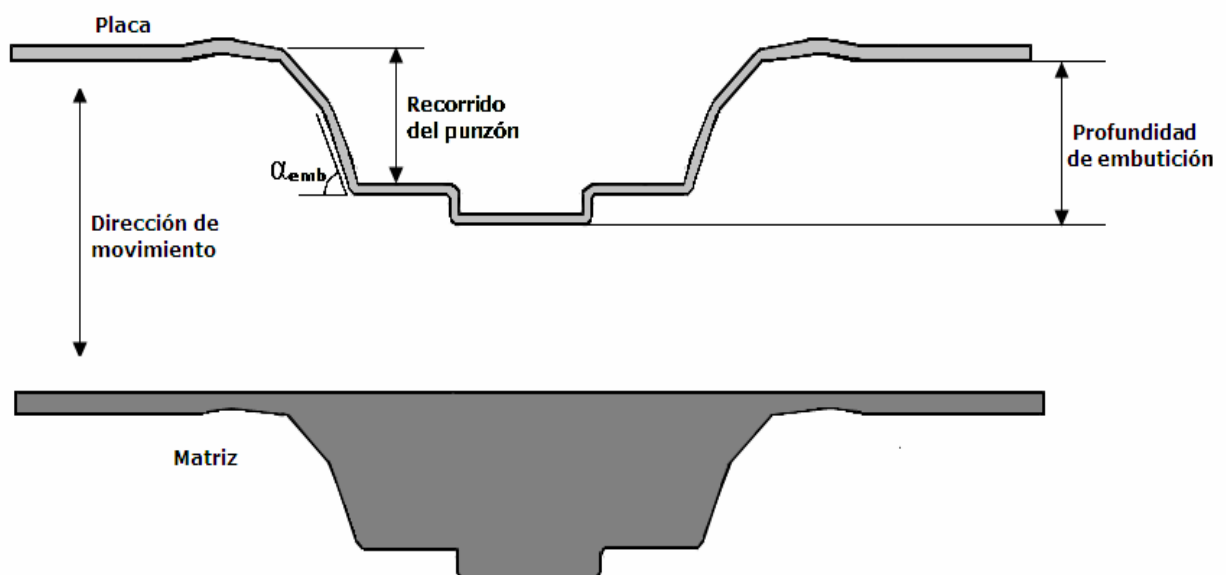



Figura 5-31 Esquema de las medidas realizadas en la placa simulada

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 5 Página: 136
--	--------------------------------------	---------------------------------

Según los tramos definidos en la Figura 5-8, se extraen del fichero de ANSYS los desplazamientos de los nodos según los ejes X y Z (se recuerda la aproximación de $y=0$). De todos los resultados obtenidos tal y como se ha comentado, se escogen los relativos a los nodos que se encuentran en la banda definida en la Figura 5-9 y pertenecen además a los tramos 3 y 4. Los resultados que se muestran en la tabla son:

Tramo 3 (-120<x<70)			Tramo 4 (70<x<120)		
Nodo	X _{2s} (mm)	Z _{2s} (mm)	Nodo	X _{2s} (mm)	Z _{2s} (mm)
20189	-118,07	63,20	28791	70,49	0,89
20190	-115,06	63,20	29099	72,18	0,91
20191	-111,99	63,30	29463	73,94	0,93
20192	-109,01	63,20	29824	75,75	0,99
20193	-106,07	62,52	26033	77,75	1,17
20194	-103,60	60,87	26592	79,66	1,70
20195	-101,76	58,48	26284	81,41	2,77
20196	-100,58	55,71	20279	82,76	4,38
20197	-99,57	52,88	20344	84,02	6,95
20198	-98,68	49,98	20345	85,03	9,59
20199	-97,70	47,03	20346	85,95	12,28
20200	-96,69	44,06	20347	86,86	15,03
20201	-95,63	41,07	20348	87,70	17,79
20202	-94,61	38,10	20349	88,57	20,61
20203	-93,46	35,23	20350	89,41	23,42
20204	-92,36	32,35	20351	90,33	26,24
20205	-91,37	29,43	20352	91,26	29,04
20206	-90,44	26,61	20353	92,27	31,93
20207	-89,53	23,80	20354	93,32	34,79
20208	-88,65	20,99	20355	94,45	37,68
20209	-87,80	18,19	20356	95,46	40,62
20210	-86,94	15,41	20357	96,49	43,58
20211	-86,07	12,65	20358	97,58	46,55
20212	-85,16	9,95	20359	98,48	49,50
20213	-84,18	7,30	20360	99,43	52,40
20188	-82,99	4,71	20361	100,36	55,21
26155	-81,72	3,05	20362	101,53	58,03
26474	-80,00	1,88	20363	103,22	60,51
25911	-78,13	1,30	20364	105,65	62,32

Tramo 3 (-120<x<70)			Tramo 4 (70<x<120)		
Nodo	X _{2s} (mm)	Z _{2s} (mm)	Nodo	X _{2s} (mm)	Z _{2s} (mm)
29703	-76,59	1,09	20365	108,48	63,19
29341	-75,11	1,03	20366	111,50	63,30
28978	-73,64	0,99	20367	114,55	63,18
28669	-72,25	0,98	20368	117,58	63,18
28367	-70,84	0,95	28791	70,49	0,89
20189	-118,07	63,20	29099	72,18	0,91

Tabla 5-16 Resultados de la Simulación Etapa 2

- Donde:
- X_{2s} = posición de los nodos de la placa simulada en la Etapa_0 una vez que la placa ha sido embutida.
- Z_{2s} = cota de los nodos de la placa simulada después de la embutición (Z_{inicial} = 0, la placa se encuentra en el plano XY).

Placa Real:

Como en la primera etapa, las siguientes figura y tabla representan igualmente la deformación de la placa real una vez embutida para la línea y=0.). La siguiente figura muestra el escaneado de la placa después de la Etapa_2. Sobre estos puntos se van a medir la profundidad y el ángulo de embutición.

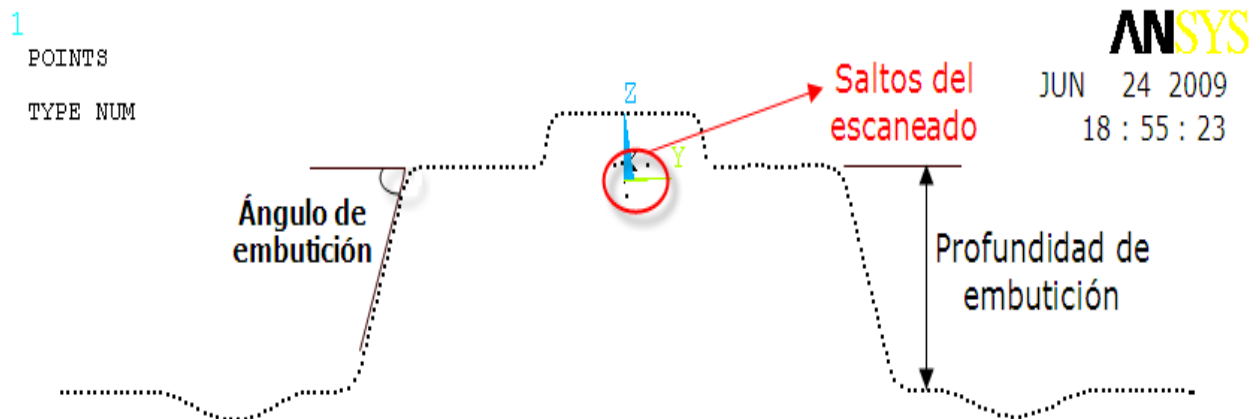



Figura 5-32 Escaneado de la placa real en la Etapa 2

Los datos del escaneado que se encuentran dentro de los tramos 3 y 4, así como de la banda $-0.7\text{mm} < Y < 0.7\text{mm}$ son los siguientes:



Tramo 1 (-120<x<70)		Tramo 2 (70<x<120)	
X _{2R} (mm)	Z _{2R} (mm)	X _{2R} (mm)	Z _{2R} (mm)
-118,86	58,59	70,53	-3,82
-116,33	58,62	73,06	-3,82
-113,77	58,65	75,57	-3,78
-111,17	58,58	78,00	-3,60
-108,53	58,30	80,25	-3,02
-105,78	57,49	82,18	-1,74
-103,30	55,51	83,62	0,21
-101,80	52,93	84,67	2,44
-100,80	50,50	85,54	4,79
-99,94	48,07	86,38	7,18
-99,14	45,66	87,18	9,58
-98,35	43,24	87,97	11,99
-97,57	40,82	88,73	14,40
-96,80	38,40	89,49	16,83
-96,02	35,99	90,26	19,26
-95,22	33,60	91,05	21,68
-94,37	31,21	91,85	24,10
-93,53	28,82	92,67	26,52
-92,68	26,42	93,53	28,92
-91,86	24,00	94,38	31,31
-91,07	21,58	95,20	33,70
-90,28	19,17	96,02	36,11
-89,50	16,74	96,81	38,51
-88,73	14,33	97,59	40,93
-87,95	11,92	98,38	43,35
-87,16	9,51	99,16	45,76
-86,35	7,11	99,95	48,19
-85,52	4,73	100,78	50,63
-84,65	2,38	101,78	53,05
-83,63	0,18	103,19	55,48
-82,30	-1,71	105,63	57,45
-80,40	-3,05	108,58	58,36

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 5</p> <p>Página: 139</p>
--	---	--

Tramo 1 (-120<x<70)		Tramo 2 (70<x<120)	
X _{2R} (mm)	Z _{2R} (mm)	X _{2R} (mm)	Z _{2R} (mm)
-78,08	-3,68	111,30	58,49
-75,61	-3,82	113,79	58,65
-73,08	-3,83	116,39	58,76
-70,54	-3,83	118,97	58,72

Tabla 5-17 Mediciones en la pieza real (escaneado) Etapa 2

Comparación entre la Placa Simulada y la Real:

A continuación, se presenta la gráfica correspondiente a los resultados de los desplazamientos obtenidos, tanto para la placa soporte real como para la simulada. Hay que aclarar que se ha desplazado la simulada con respecto a la real con el fin de facilitar la visualización de ambas.

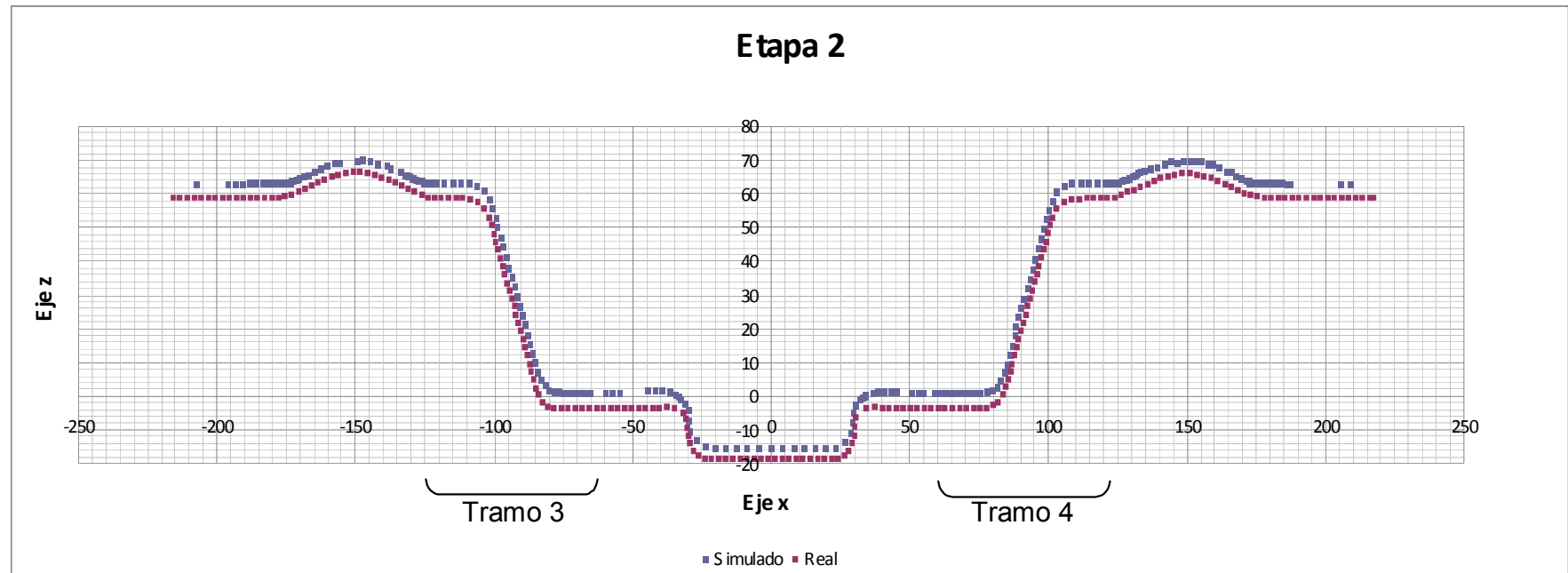


Figura 5-33 Resultados Etapa 2

Mediciones:

La siguiente tabla refleja las mediciones obtenidas tanto de profundidad de embutición como de ángulo de embutición en cada uno de los tramos considerados. Las mediciones están reflejadas tanto para la pieza simulada como para la pieza real escaneada, de forma comparativa.

Tramo 3				Tramo 4			
Prof. Embutición		Angulo Embutición		Prof. Embutición		Angulo Embutición	
Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado
62,42 mm	62,25 mm	71,54°	70,84°	62,54 mm	62,29 mm	71,43°	71,28°

Tabla 5-18 Profundidad y ángulo de embutición de las placas real y simulada

Para ver con más detalle cómo se han realizado las medidas a partir de los nodos de la placa simulada, la Figura 5-17 muestra una ampliación de la zona central de la embutición.

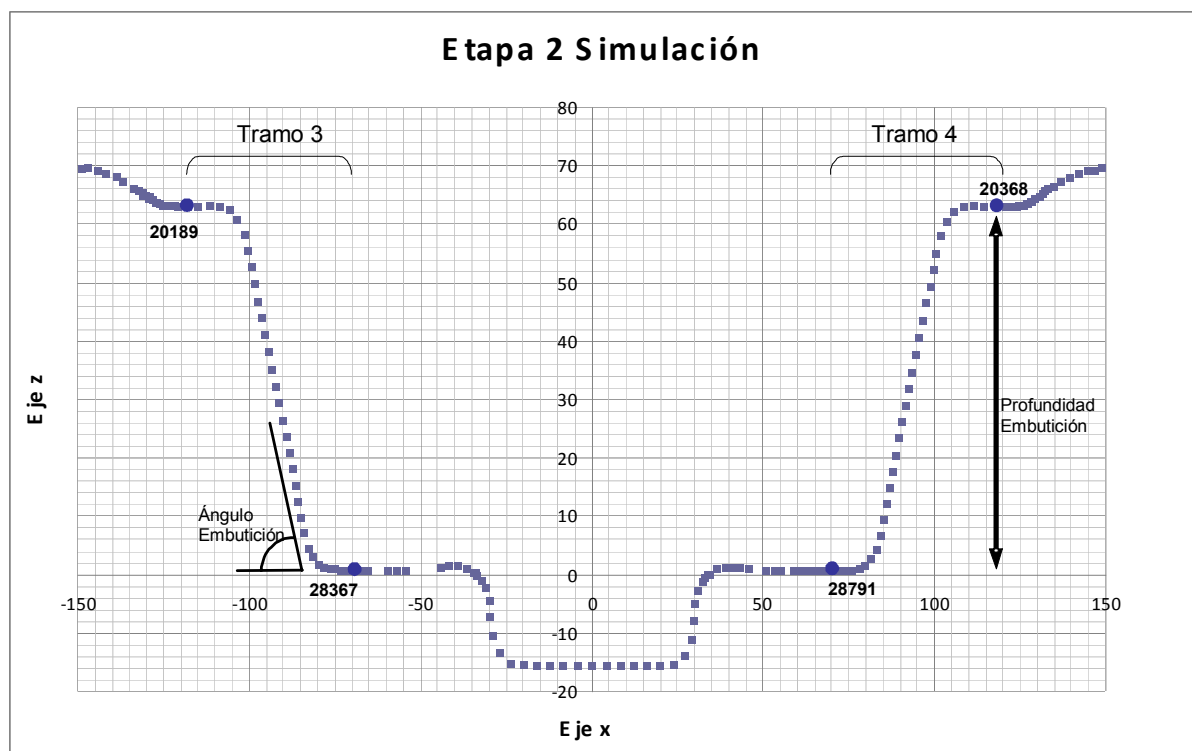



Figura 5-34 Detalle de los resultados de la embutición de la Etapa 2

5.4.4.2. Análisis de los Resultados

Finalmente, haciendo de nuevo un análisis de los resultados presentados para la Etapa_2 en la sección anterior se puede destacar lo siguiente:

- En primer lugar el aspecto más destacable es que la placa en la simulación se rompe por algunas zonas, como se puede observar en la Figura 5-29. Esta es una diferencia muy notable con el caso real, ya que en este caso no ocurre en las mismas condiciones. Las posibles razones por las que este hecho ocurre podrían ser:


	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 5</p> <p>Página: 142</p>
--	---	---

- Tanto la herramienta ANSYS como los métodos de cálculo que utiliza puede que no sean los más adecuados. Esta causa, a pesar de los resultados obtenidos en esta etapa, es descartable teniendo en cuenta que los resultados obtenidos en las etapas anteriores no difieren mucho de los reales.
- Con la hipótesis de que la herramienta es válida, la posible causa sería que el modelo de material elegido no ha sido el más adecuado y que su comportamiento no es lo suficientemente cercano al material real. El modelo simulado podría ser demasiado simple. Esta causa se puede reforzar por el hecho de que, como se comprueba en las etapas anteriores, el modelo parece simular un modelo menos elástico que el real ya que según las diferencias en los ángulos de embutición, el modelo simulado recupera menos que la placa real.

Aún teniendo en cuenta que la placa simulada se ha quebrado, se considera interesante comparar de nuevo las mediciones de profundidad de embutición y ángulo para este caso:

- En una primera vista general de la Figura 5-33 se puede ver que la deformación obtenida de la placa simulada respecto a la placa real es similar en los dos casos, sin apreciar ninguna diferencia notable.
- Analizando los resultados numéricos proporcionados en la Tabla 5-18, se corroboran dichas apreciaciones. Las profundidades de embutición tienen una diferencia de 0,17 mm en el tramo 3 y de 0,25 mm en el tramo 4, mientras que la diferencia en el ángulo es de 0,7° en el tramo 3 y 0,15° en el tramo 4. En este caso la diferencia son menores que en las etapas anteriores.
- Como ocurría en las etapas anteriores, existen igualmente diferencias entre los tramos 3 y 4 en este caso, a pesar de la simetría de la placa respecto al eje y tanto en el caso simulado como en el real. Las diferencias en este caso son del mismo orden.

Cabe, por tanto, destacar en este caso, que a pesar de que la placa se rompe, las diferencias entre las mediciones de la simulación y el caso real son despreciables. No se pueden sacar muchas conclusiones debido al hecho de que se rompe la placa, pero podría ser un indicativo de que la herramienta y la metodología empleada funcionan y de que el error cometido ha sido en la elección del modelo del material. Aunque esta idea no es concluyente y sería necesario investigarla con más profundidad.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 6 Página: 143
--	--------------------------------------	--

6. CONCLUSIONES


El objetivo de simular el proceso completo de embutición de la chapa no se ha conseguido en su totalidad puesto que en el tercer paso ha tenido lugar la rotura de la misma. Sin embargo, teniendo en cuenta que las etapas 0 y 1 sí se han logrado simular de forma satisfactoria, se puede afirmar que trabajando en ciertas variables del problema se podría llegar a conseguir el objetivo planteado.

Entre las posibles razones que podrían haber causado la rotura de la placa, se pueden citar:


- La simplicidad del Modelo de material: se ha elegido un modelo de material simple para la simulación del proceso porque, en un principio, era de esperar que funcionase correctamente en las dos últimas etapas, al no observarse problemas en la simulación de la Segunda. En la segunda embutición se esperaba obtener las tensiones más elevadas del proceso y el modelo de material escogido parecía simularlo correctamente. Hay que destacar, que este modelo no contempla variación de temperatura durante la deformación del material.
- El hecho de que la geometría presenta variaciones frente a la realidad: Los troqueles se fabrican a partir del CAD, pero según se va ajustando el proceso de fabricación, se realizan sobre él ciertas modificaciones que posteriormente no se añaden al CAD. Hay que contar por lo tanto con esas diferencias y tratar de mantener la geometría dibujada lo más parecida posible a la realidad.
- La dinámica de la embutición: En las simulaciones la fuerza de los pisas es constante en todo momento, mientras que en la realidad, éstos se apoyan sobre resortes que aplican una fuerza progresiva durante la bajada y retirada de las herramientas. Sin embargo, no se ha considerado el hecho de construir una curva que refleje el comportamiento real de los pisas, ya que habría que evaluar con qué hipótesis de funcionamiento se comete más error.
- Del proceso implementado se puede destacar:
 - Ha funcionado para los dos primeros pasos (dando por buenos los resultados mejorables con un mallado distinto). Luego siguiendo en esa línea y variando ciertas características del modelo como el modelo de material, se conseguiría que funcionasen todas las etapas.
 - La forma de la placa deformada es muy parecida a la real. Por lo tanto la metodología empleada es capaz de simular correctamente la secuencia de movimientos de todos los elementos y obtener una solución con un error cometido aceptable.
 - Además, el hecho de que la placa real tenga una mayor recuperación que la placa simulada en esto dos pasos, refuerza la idea de que el modelo de material pueda ser demasiado simple.

Por tratarse de un proyecto académico, el éxito no está sólo fundamentando en la consecución de su objetivo sino que también ha de medirse en cuanto que ha permitido demostrar la capacidad para plantear un proceso metodológico, analizar resultados y extraer conclusiones valiosas aplicables en el ámbito profesional. Entre las lecciones aprendidas, se pueden destacar las siguientes:

- Es imprescindible conocer más en profundidad tanto el proceso que se quiere simular como la herramienta empleada, para definir el modelo con el que se va a trabajar de forma más fiel al proceso real.

	<p>UNIVERSIDAD CARLOS III</p> <p>MADRID</p>	<p>Capítulo : 6</p> <p>Página: 144</p>
--	---	---


- Sería muy útil utilizar en el proceso listas de comprobaciones para sistematizar la preparación de los modelos y por tanto hacer que sea más eficiente. Por ejemplo:
 - Comprobar que se han introducido correctamente y asignado las propiedades del material a los elementos correspondientes.
 - Comprobar la asignación de partes y la secuencia de movimientos (vectores).
 - Comprobar que se han definido y asignado correctamente las cargas.
 - Comprobar que están activos todos los elementos del conjunto.
 - Comprobar que la escala es la real para evitar deformaciones no reales de la placa.
- La gestión eficaz de archivos y de su configuración es imprescindible para no perder información de una etapa a otra.
- Sería conveniente mejorar el método de mallado de forma que se mantengan las simetrías geométricas de la pieza. Optimizando y facilitando el análisis de los resultados.
- El tiempo de resolución es un factor clave a la hora de resolver las simulaciones por lo que habría que tratar de disponer de máquinas con procesadores más rápidos para acelerar en lo posible el cálculo de las mismas.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 7 Página: 145
--	--------------------------------------	---------------------------------

7. TRABAJOS FUTUROS

Partiendo del proyecto realizado y teniendo en cuenta los resultados y conclusiones extraídas, se proponen a continuación una serie de ideas que constituyen una línea de futuros trabajos a realizar:


- El más evidente es la finalización completa del proceso de embutición considerado, solucionando algunos de los aspectos encontrados en el proyecto realizado, como por ejemplo:
 - Utilizar distintos modelos de material que puedan reflejar de una forma más precisa el comportamiento real de la placa.
 - Trabajar en la obtención de mallados simétricos, para ajustar más los resultados obtenidos. Minimizando en lo posible las diferencias de resultados dentro del modelo.
 - Considerar una representación de las fuerzas de los pisas tal y como sucede en la realidad.
 - Tratar de mantener el CAD actualizado con las modificaciones realizadas sobre los propios troqueles.
- Una vez que se haya conseguido simular el proceso completo, se podría analizar el comportamiento de otros materiales, como: aluminio, aleaciones de aluminio, aceros de alta y ultra resistencia, etc., siempre buscando disminuir el peso de los componentes del automóvil para favorecer el ahorro de combustible y sin descuidar la seguridad.
- Determinar una comparación lo más real posible de las tolerancias de la simulación y del proceso real, de forma que se ajuste lo máximo posible la forma final de las piezas estudiadas.
- Realización de un estudio económico que determine el impacto en costes, para una empresa, del empleo de una herramienta de simulación, con el fin de optimizar el proceso de fabricación de una pieza. Para ello, sería necesario tener en cuenta, entre otros costes, los asociados a la fabricación de troqueles prototipo incluyendo sus ensayos antes de fabricar los definitivos (sin apoyo de la herramienta de simulación), frente a los costes asociados a las horas de ingeniería que supondría utilizar la herramienta de simulación más la inversión en las licencias de los programas de Elementos Finitos (software necesario).
- Extrapolar los resultados obtenidos a cualquier otro proceso de fabricación. De forma que la herramienta de simulación sea lo más versátil posible, sin las limitaciones actuales: del proceso, material, cargas aplicadas, velocidad de desplazamiento de los troqueles, etc.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 8 Página: 146
--	--------------------------------------	---------------------------------


8. GLOSARIO DE TÉRMINOS Y DEFINICIONES

Acrónimo:	Descripción
ASTS	Automatic Surface to Surface (Contacto Automático de Superficie a Superficie).
IGES	Initial Graphics Exchange Specification (formato utilizado para compartir datos de sistemas CAD entre diferentes sistemas de CAD y CAM).
MEF	Método de los Elementos Finitos.
MMC	Máquina de medir por coordenadas.
NIP	Number of integration Points (Número de Puntos de Integración).
NTS	Node to Surface (Nodo a Superficie).
PART ID	Número de Parte.
SHRF	Shear Factor (Esfuerzo Cortante).
SS	Single Surface (Superficie Única).
T1, T2, T3, T4	Shell Thickness at nodes I, J, K, L (Espesor del Elemento en los nodos I, J, K, L).


Término:	Descripción
Amolado de Herramientas	Empleo de un abrasivo para afilar herramientas de corte.
Coeficiente de Poisson	Cociente entre las deformaciones laterales y axiales en un ensayo de tracción ($\nu = \varepsilon_x / \varepsilon_z = \varepsilon_y / \varepsilon_z$)
Coeficiente de Seguridad	Índice que se utiliza en el diseño de elementos estructurales, proporcionando un margen de seguridad por encima de las prestaciones mínimas estrictamente necesarias para su correcto funcionamiento. Por ejemplo: $n_s = S / \sigma$, donde: n_s es el coeficiente de seguridad, S es la resistencia del material y σ tensión máxima aplicada.
Coeficiente de Tensión de Rotura	Coeficiente de seguridad que minora la tensión de rotura en un factor determinado, siempre por debajo de la unidad.
Curvas de Carga	Deformación obtenida de los distintos ensayos de un material.
Deformaciones Principales	Deformaciones existentes en las direcciones principales de deformación (las deformaciones tangenciales se anulan), coincidentes con las direcciones principales de tensión (los esfuerzos tangenciales se anulan)
Ductilidad	Capacidad de un material para soportar grandes deformaciones y almacenar gran cantidad de energía antes de su rotura.
Endurecimiento por deformación	Fenómeno por el cual un metal dúctil se hace más duro y resistente a medida que es deformado plásticamente. A veces, se denomina acritud, o endurecimiento por trabajo en frío, debido a que la temperatura a la que ocurre es "fría" en relación a la temperatura de fusión del metal.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 8 Página: 147
--	--------------------------------------	---------------------------------

Término:	Descripción
Esfuerzo Cortante	Esfuerzo tangencial o de cizalladura producido sobre un componente estructural ($\tau = F_{\text{tan}} / A$)
Fragilidad	Capacidad de un material para fracturarse con poca o ninguna deformación plástica y prácticamente sin absorción de energía durante el proceso de rotura.
Fresado	El fresado consiste en el corte del material mecanizado con una herramienta rotativa de varios filos (plaquitas de metal duro), que ejecuta movimientos de avance de la mesa de trabajo, donde va fijada la pieza.
Hourglass	Fenómeno de deformación que aparece debido a que la integración reducida se realiza en el punto central del elemento que por simetría no sufre deformaciones. Luego la malla sufre deformaciones no realistas, que distorsionan el cálculo. Las formas de Hourglassing son estados matemáticos que no son físicamente posibles.
Integración reducida	Método numérico para la resolución de la integral de una función en un recinto, aproximando su valor a la suma ponderada de los valores de dicha función en ciertos puntos de dicho recinto llamados nodos.
Lapeado	Pulido con una pasta abrasiva que elimina material no deseado.
Límite de cizalladura	Tensión a partir de la cual el material rompe por cizalladura. Definiendo este esfuerzo como: $\tau = F / A_0$, donde F: carga o fuerza impuesta paralelamente a las caras superior e inferior, cada una de las cuales tiene un área A_0 .
Límite Elástico	Tensión a partir de la cual se produce deformación plástica en un metal o aleación.
Límite Elástico Aparente o Límite de Fluencia	Valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la fluencia. Para los metales que experimentan la deformación elastoplástica de forma gradual, el punto de fluencia puede determinarse como la desviación inicial de la linealidad de la curva tensión-deformación.
Módulo de Young	En una deformación elástica, el módulo de elasticidad o módulo de Young, es la constante de proporcionalidad (E) entre la tensión aplicada y la deformación producida (Ley de Hooke, $\sigma = E \cdot \varepsilon$)
Módulo Tangente	Pendiente de la tangente a la curva en el diagrama tensión-deformación en un punto determinado (hay un valor para cada tensión).
Módulo Tangente	Pendiente de la curva tensión-deformación en un determinado nivel de tensión.
Nodos	Los nodos son puntos que conectan las partes o elementos en los que se divide un cuerpo físico continuo en el método de los elementos finitos.
Prensa	Una prensa es una máquina herramienta que tiene como finalidad, lograr la deformación permanente o el corte de un material determinado, mediante la aplicación de una carga.
Prensa Hidráulica	Prensa impulsada por energía hidráulica que utiliza dos cilindros de diferente sección, comunicados entre sí para aplicar la carga sobre el

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 8 Página: 148
--	--------------------------------------	---------------------------------

Término:	Descripción
	material que se quiere trabajar. Aplicando fuerzas pequeñas se obtienen otras mayores.
Rebabas	Material sobrante en los laterales de una pieza tras un proceso de conformado como la forja.
Rigidez	Resistencia de un material a la deformación elástica.
Tensión de Rotura	La tensión o carga de rotura es la tensión máxima que soporta el material antes de romperse ($\sigma_{rotura} = F_{aplicada} / A_{final}$).
Tensiones Principales	Tensiones generadas en las direcciones principales de tensión, es decir, aquellas direcciones normales a planos en los que no existen esfuerzos tangenciales.
Tensiones residuales	Tensiones internas que permanecen en el material aún después de retirarse la carga aplicada sobre el cuerpo.
Torneado	Proceso de mecanizado, con arranque de viruta por medio de una herramienta, realizado en un torno sobre piezas de revolución cilíndricas como ejes. Permite pequeñas tolerancias y acabados superficiales buenos.
Velocidad de deformación ($\dot{\epsilon}$)	Magnitud que mide la variación de la deformación de un material con respecto al tiempo.
Pre-procesador	Módulo del programa de elementos finitos que permite discretizar el modelo real (continuo) en elementos y nodos (mallado) en los cuales se calcularán desplazamientos, deformaciones, tensiones y otras magnitudes.
Solución	Módulo del programa que permite la creación y resolución del sistema de ecuaciones matriciales, generando una serie de archivos de resultados que serán utilizados en el post-procesador.
Post-procesador	Una vez que se ha resuelto el análisis, permite analizar y visualizar los archivos de resultados.

	UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID	Capítulo : 9 Página: 149
--	--------------------------------------	---------------------------------

9. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS UTILIZADAS

Lista de Referencias:

Numeración	Título, Autor/ Editorial-Organización, Edición y Fecha
[1]	"Simulación de un proceso de embutición mediante LS-DYNA", Marcos Sánchez del Cura/ Universidad Carlos III de Madrid, 2007.
[2]	"Theory of Matrix Structural Analysis", J.S. Przemieniecki / Dover Publications NY, 1ª Ed., 1985.
[3]	"A treatise on the mathematical theory of elasticity", A.E.H. Love/ Dover Publications NY, 4ª Ed., 1944.
[4]	"Advanced Mechanics of Materials", Richard J. Schmidt & Omar M. Sidebottom / John Wiley & Sons, Inc., 5ª Ed. 1993.
[5]	"El Método de los Elementos Finitos en el Análisis Estructural", C. Martínez Arnaiz / Publicaciones de la E.T.S.I.A (Escuela Superior de Ingenieros Aeronáuticos), 1998.
[6]	"El Sector del Automóvil: Retos 2008-2012", Mª Luisa Soria (SERNAUTO), Cámara de Guipúzcoa (Donostia), 2008.
[7]	"Informe técnico sobre nuevos materiales aplicados a componentes del sector de la automoción", Fundación ASCAMM (Asociación Catalana de Empresas de Moldes y Matrices), Marzo 2003.
[8]	"Apuntes de la asignatura Tecnología Mecánica", departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, curso 2006-2007
[9]	"Tecnología de proceso y transformación de materiales", Ediciones UPC, Salán Ballesteros M.Núria, 2005.
[10]	"Construcción de herramientas", Ed. Reverté, Robert Lehnert y Carlos Sáenz de Magarola, 1979.
[11]	"Apuntes de Administración de Empresas y organización de la Producción", Universidad Carlos III de Madrid, curso 2005-2006
[12]	ANSYS Release 9.0 Documentation.
[13]	ANSYS LS-DYNA User's guide (version 9.0)
[14]	Simulación de un proceso de embutición mediante ANSYS/LS-DYNA, Universidad Carlos III de Madrid, Juan Francisco Muñoz Díaz, 2007.

Páginas Web Consultadas:

- [15] www.acerosuddeholm.com, News > Resumen de Jornada Técnica aceros de alta resistencia. (Junio 2009)
- [16] www.ansys.com (febrero 2009)
- [17] www.Cadvisionl.com /ANSYS, software de elementos finitos (abril 2009)
- [18] www.ingeciber.com /ANSYS / LS-DYNA (mayo 2009)
- [19] <http://www.fem.unicamp.br/~lafer/im437/Cap11.pdf> (mayo 2009)
- [20] www.directIndustry.es, ANSYS (junio 2009)

ANEXO A

Especificaciones de suministro:

SOPORTE RUEDA DE REPUESTO

- **Descripción:** fleje de acero laminado en frío microaleado soldable (código DIN 10338)
- **Composición química:** $C \leq 0,080\%$, $Mn \leq 0,40\%$, $P \leq 0,030\%$, $S \leq 0,030\%$
- **Características mecánicas (requeridas en inspección):** $R \leq 21$ kg/mm; E 27:35 kg/mm
- **Dimensiones:** Ancho de banda $218 \pm 0,5$ mm; Paso 535 mm; espesor $2 \pm 0,12$ mm; efecto sable 1,5 %; efecto teja 0,2 %; \varnothing interior o ancho 500 +20-0 mm; \varnothing exterior o largo 1200 +0-20 mm; peso formato 1954 kg
- **Embalaje:** dimensiones 1200 x 1200 x 350 mm; tipo de embalaje paletizado tipo A; formato 1 bobina; peso bruto 1980 kg.
- **Protección:** aceitado ligero de fácil eliminación.
- **Otros requerimientos:** bobinas bien despuntadas al principio y al final.
- **Identificación:** identificación de las bobinas por rollos o unidades de embalaje, fecha de envío y nº de bultos.
- **Documentos y certificaciones de calidad que deben acompañar al producto:** el material debe venir acompañado de su correspondiente certificado de calidad con análisis químico y ensayos mecánicos por bobina.

-ANEXO B